



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA ELEKTROTECHNIKY A KOMUNIKAČNÍCH TECHNOLOGIÍ

FACULTY OF ELECTRICAL ENGINEERING AND COMMUNICATION

ÚSTAV ELEKTROTECHNOLOGIE

DEPARTMENT OF ELECTRICAL AND ELECTRONIC TECHNOLOGY

SELEKTIVNÍ PÁJENÍ

SELECTIVE SOLDERING

DIPLOMOVÁ PRÁCE

MASTER'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Bc. Lukáš Stoklásek

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. Jiří Starý, Ph.D.

BRNO 2019

Diplomová práce

magisterský navazující studijní obor **Elektrotechnická výroba a materiálové inženýrství**

Ústav elektrotechnologie

Student: Bc. Lukáš Stoklásek

ID: 173747

Ročník: 2

Akademický rok: 2018/19

NÁZEV TÉMATU:

Selektivní pájení

POKYNY PRO VYPRACOVÁNÍ:

Prostudujte problematiku selektivního pájení.

Navrhněte optimální technologické řešení pro konkrétní produkt.

Proveďte praktické zkoušky selektivního pájení na pájecí vlně s maskou i selektivního pájení s lokální tryskou.

Vyhodnoťte technologické, ekonomické i kvalitativní aspekty použitých metod. Uveďte doporučení pro výrobu.

Spolupráce s firmou Honeywell-Resideo Brno

DOPORUČENÁ LITERATURA:

Podle doporučení vedoucího práce

Termín zadání: 4.2.2019

Termín odevzdání: 21.5.2019

Vedoucí práce: Ing. Jiří Starý, Ph.D.

Konzultant:

doc. Ing. Petr Bača, Ph.D.
předseda oborové rady

UPOZORNĚNÍ:

Autor diplomové práce nesmí při vytváření diplomové práce porušit autorská práva třetích osob, zejména nesmí zasahovat nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a musí si být plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících autorského zákona č. 121/2000 Sb., včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení části druhé, hlavy VI. díl 4 Trestního zákoníku č.40/2009 Sb.

Abstrakt

Diplomová práce seznamuje s problematikou selektivního pájení. Teoretická část obsahuje popis procesu pájení a jeho jednotlivé metody, možnost využití metod pro selektivní pájení a kontrolu výroby. V praktické části jsou změřeny jednotlivé podprocesy pájení vlnou – množství naneseného tavidla a jeho homogenita, stabilita a vliv předehřevů, kontaktní doby vln. Dále jsou prezentovány výsledky produkčního testu daného produktu, čistota výrobních procesů, rentgenová diagnostika a mikrovýbrusy. V závěru je shrnuto ekonomické zhodnocení jednotlivých procesů. Hlavním cílem této práce je navrhnout optimálního výrobního procesu pro konkrétní DPS.

Klíčová slova

Selektivní pájení, pájení vlnou, tavidla, rentgenová diagnostika, mikrovýbrus

Abstract

This diploma thesis introduces the problematics of selective soldering. The theoretical part deals with description of soldering process and its possibilities, use of these processes for selective soldering and the control of production. The practical part describes the methodics of measuring the amount and uniformity of flux applied on printed circuit boards, effects and stability of preheaters and dwell time if PCB in the soldering wave. The next part deals with the production test for the certain product, cleanness of the single processes, x-ray diagnostics and cross section of the boards. In the end is economic evaluation of the processes. The main object of this thesis is to suggest the optimal production process for the product.

Key words

Selective soldering, wave soldering, fluxes, x-ray diagnostics, microsection

Poděkování

Děkuji vedoucímu diplomové práce Ing. Jiřímu Starému, Ph.D. za účinnou metodickou, pedagogickou a odbornou pomoc a další cenné rady při zpracování práce. Dále děkuji Ing. Zdeňku Jurčíkovi za odbornou pomoc se zpracováním praktické části a poskytnutí technických zařízení firmy Resideo a Bc. Michaelu Velímovi za zprostředkování rentgenové diagnostiky. Také děkuji svým rodičům za finanční podporu v průběhu celého studia.

Bibliografická citace

STOKLÁSEK, L. *Selektivní pájení*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií. Ústav elektrotechnologie, 2019. 63 s. Diplomová práce. Vedoucí práce: Ing. Jiří Starý, Ph.D.

Obsah

Úvod.....	7
1. Pájení.....	8
1.1. Pájecí slitiny	8
1.2. Tavidla	9
1.3. Pájení v ochranné atmosféře.....	11
1.4. Pájení přetavením	12
1.4.1. Konvekční pájení.....	13
1.4.2. Pájení infraohřevem	13
1.4.3. Kondenzační pájení	14
1.4.4. Technologie Pin-In-Paste	14
1.5. Pájení laserem.....	15
1.6. Ruční pájení.....	15
1.7. Strojní pájení vlnou	16
1.7.1. Aplikace tavidla.....	17
1.7.2. Předehřev desky	17
1.7.3. Pájení vlnou.....	18
1.7.4. Chlazení.....	19
1.7.5. Čištění.....	20
1.7.6. Selektivní pájení vlnou.....	20
1.8. Pájení pomocí selektivní trysky.....	21
2. Kontrola kvality.....	21
2.1. Testování smáčivosti	24
2.2. Konduktometrické metody zjišťování čistoty	25
3. Praktická část s diskuzí dosažených výsledků	26
3.1. Definované cíle.....	26
3.2. Popis DPS použité pro testování	26
3.3. Testovaná zařízení	28
3.3.1. Vlna 1 (Vitronics Soltec Delta 5).....	28
3.3.2. Vlna 2 (Ersa Powerflow).....	28
3.3.3. Vlna 3 (Ersa Powerflow e N2)	29
3.3.4. Selektivní zařízení EBSO SPA250F	30
3.4. Produkční testování	31
3.4.1. Programy použité pro produkční test	31
3.4.2. Nejčastější defekty po pájení produktu	37
3.5. Rentgenová diagnostika a mikrovýbrus	40
3.5.1. Rentgenová diagnostika	40

3.5.2. Mikrovýbrus konektorů	42
3.6. Testování čistoty výroby	44
3.7. Testování smáčivosti vývodu	47
3.8. Ověření stability výrobního procesu na vlně 1	48
3.8.1. Měření naneseného množství tavidla ve vlně 1	48
3.8.2. Testování homogenity nanesení tavidla vlny 1	50
3.8.3 Měření zón přehřevu vlny 1	52
3.8.4 Měření závislosti kontaktní doby na výkonu čerpadla vlny 1	54
3.9. Ekonomické zhodnocení výroby produktu	56
4. Závěr.....	57
Použitá literatura	58
Seznam obrázků	60
Seznam tabulek	61
Seznam grafů	62
Seznam použitých zkratek.....	63

Úvod

V dnešní době se většina výrobních závodů snaží o optimalizaci výrobních procesů, zvyšování kvality produktů a snižování nákladů na výrobu. S rostoucí hustotou zástavby desek plošných spojů povrchovými komponentami SMD je stále více žádána technologie selektivního pájení. Jedná se o lokálně aplikované pájení roztavenou pájkou, nebo kdy dochází k zahřátí a přetavení pájecí slitiny jen na určitých místech DPS. Tento proces se používá nejčastěji při dopajování vývodových součástek, např. konektorů nebo patic. Strojové selektivní pájení se používá jako alternativa k pájení rukou, případně u součástek, u kterých není možná výrobní technologie PinInPaste.

Teoretická část seznamuje se selektivním pájením, dále poté s jednotlivými možnostmi tohoto procesu a jejich částmi. Pozornost je věnována i kontrole jakosti výrobků, jednotlivých výrobních procesů a testování použitému v praktické části.

Praktická část je zaměřena na nastavení a proměření pájecích zařízení, výrobu konkrétního produktu a podrobnější zkoumání pomocí rentgenu a mikrovýbrusu. Dále je proměřena a vizuálně kontrolována čistota jednotlivých výrobních procesů. U jednoho zařízení je otestováno nanášení tavidla na desky plošných spojů, z hlediska rovnoměrnosti nanesení a množství solidu na plochu DPS. Dále jsou proměřeny přehřívací zóny a teploty na DPS po projetí přehřívem. Pomocí skla a měřicího zařízení je zjištěn vliv otáček motoru čerpadla a množství pájky ve vyhřívací vaně na kontaktní doby desky plošných spojů s bezolovnatou pájecí slitinou SN100C.

1. Pájení

Pájení je fyzikálně chemický proces, při kterém dochází k metalurgickému spojení dvou a více kovových částí roztavenou pájkou zpravidla za přítomnosti tavidla. Pro předpoklad kvalitního pájeného spoje je nutná metalurgická kompatibilita pájeného materiálu s pájkou, optimálně nastavený proces a co největší čistota při pájení. [1]

Pro pájený spoj je žádoucí mechanická pevnost a dlouhodobá spolehlivost. Těchto aspektů lze dosáhnout kombinací vhodných materiálových, environmentálních a procesních systémů. Co se týče materiálových kombinací, lze do nich zařadit povrchové úpravy pájecích plošek, volba tavidla a pájecí slitiny. V procesních systémech se nastavují teploty, rychlost nárůstu a poklesu teploty, doba, kdy je pájka v kapalném stavu v kontaktu s DPS a vývody součástek apod. V environmentálním systému volíme např. pájecí atmosféru – vzduch, řízená atmosféra (např. dusíková), případně vakuum. [2]

Kvalitou pájeného spoje a montáží elektronických sestav se zabývá norma IPC-A-610E-CZ „*Kritéria přijatelnosti elektronických sestav*“.

1.1. Pájecí slitiny

Na spojení pájených materiálů se používají různé slitiny vhodných kovů. Slitina by měla zajistit spolehlivé upevnění součástky na DPS, které bude elektricky vodivé. Dále částečně chrání pájený povrch před oxidací a odvádí ztrátové teplo. Volba slitiny závisí také na teplotním profilu pájení, stavu pájeného povrchu, smáčivosti, pevnosti a spolehlivosti spoje. Slitiny lze rozdělit na bezolovnaté a na slitiny s podílem olova. Také je možné rozdělení podle formy, ve které jsou pájky dodávány (trubičková pájka, pájecí pasta, pájkové tyče, preformy pájky) – to také záleží na oblasti použití této slitiny. [2]

Olovnaté slitiny obsahují určitý podíl olova. Nejčastější je eutektická pájka Sn63Pb37, jež obsahuje 63 % cínu a 37 % olova. Teplota tavení této slitiny je 183 °C, tím pádem je vhodná k pájení součástek s nízkou teplotní odolností. Tato pájka je v dnešní době zakázána Evropskou unií a smí se používat pouze pro kritické aplikace, proto je nahrazována jinými slitinami. [2]

Bezolovnaté pájky většinou mají vyšší teplotu tavení, pájení probíhá při teplotách přes 200 °C. Pájky mají horší tekutost a smáčecí charakteristiky, mají erozivní vliv na podkladový materiál, zejména na Cu, snadněji oxidují, proto se doporučuje použití ochranných atmosfér. Mezi nejznámější bezolovnaté slitiny patří SN100C a SAC305.

SN100C je slitina cínu, mědi, niklu a germania ($\text{SnCu}_{0,7}\text{Ni}_{0,05}\text{Ge}_{0,009}$), její hustota je 7,4 g/cm³. Teplota tavení této slitiny je 227 °C. Nikl ve slitině snižuje rozpouštění mědi a zajišťuje lesklejší vzhled spoje. Přídavek germania zlepšuje tekutost pájky a redukuje tvorbu strusky. [3]

Pájka SAC305 je označení pro slitinu cínu, stříbra a mědi ($\text{SnAg}_{3,0}\text{Cu}_{0,5}$), specifická hustota je 7,5 g/cm³. Teplota tavení této pájky je přibližně 220 °C. Tato slitina je považována za

standard pro bezolovnaté pájení. Díky přídavku stříbra má pájka dobré elektrické vlastnosti, ale vyšší cenu. [3]

Typů bezolovnatých slitin je nepřeberné množství. V tabulce 1 jsou uvedeny některé typy. Jedná se o typy slitin dodávané firmou AIM Metals&Alloys LP. Slitiny pro strojní pájení vlnou a selektivní pájení se dodávají ve formě pájkových tyčí, případně menších pelet. [3]

Tabulka 1 Typy bezolovnatých pájecích slitin firmy AIM [3]

Označení a složení	Stručný popis	Teplota tavení [°C]
Sn42Bi58	Pro nízkoteplotní aplikace	138
Sn42Bi57Ag1		138
REL61 (SnAgCuBi)	Nízký obsah stříbra, minimalizace tvorby cínových whiskerů	208 - 215
REL22 (SnAgCuBiSb)	Velmi pevná pájecí slitina pro náročné aplikace	210 – 212
CASTIN (SnAg2,5Cu0,8Sb0,5)	-	217 - 219
SAC305(SnAg3,0Cu0,5)	Průmyslový standard pro pájení	217 - 218
SAC387 (SnAg3,8Cu0,7)		217 – 218
SAC405 (SnAg4,0Cu0,5)		217 – 218
Sn96,5Ag3,5	Eutektická cín-stříbrná pájka. Vyžaduje vyšší teplotu, než SAC pájky	221
SAC-B 0307 (SnAg0,3Cu0,7)	Levnější alternativa SAC pájek	217 – 227
SAC-B 0107 (SnAg0,1Cu0,7)		217 – 227
SN100C (SnCu0,7Ni0,05Ge)	Pájky s nízkým (žádným) obsahem stříbra	227
Sn99,3Cu0,7		227
SCAN		227
Sn97Cu3	Bezolovnatá pájka pro vysokoteplotní aplikace	227-300
Sn95Sb5	Pájky pro vysokoteplotní aplikace	235-240
Bi97,5Ag2,5		263
Au80Sn20	Ideální pro pájení zlatem, velká pevnost a spolehlivost	281
Bi95Sb5	Slitina pro vysokoteplotní aplikace	275-308
Au88Ge12	Slitina pro upevnění polovodičů na substrát	356

1.2. Tavidla

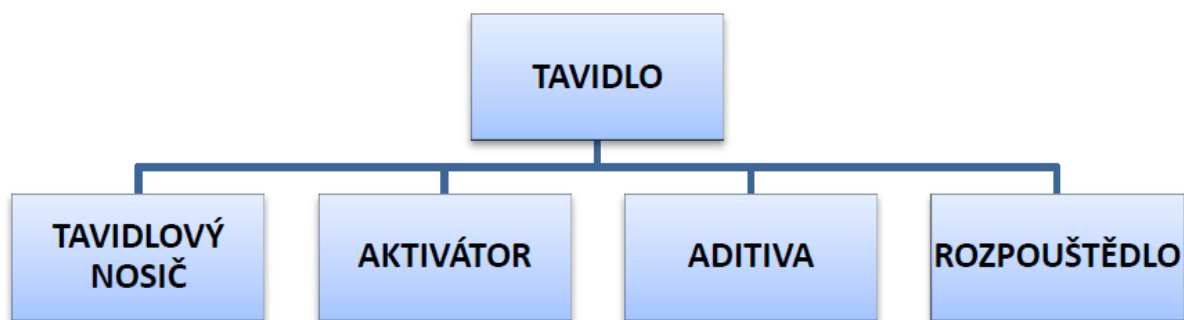
Tavidla jsou převážně kapalné, plynné, případně pevné směsi, které po ohřevu zlepšují smáčecí proces při tvrdém nebo měkkém pájení. Za zvýšené teploty odstraňují oxidy a v určitém rozsahu brání jejich opětovnému vzniku, nečistoty a pomáhají chránit povrch pájeného materiálu při pájení. Při reakci s oxidy tavidla zvýší povrchové napětí pájeného povrchu a tím dojde ke zlepšení smáčivosti. [1]

Tavidlo by mělo v co největší míře podporovat smáčení materiálu pájkou, v maximální míře a co nejrychleji rozpouštět oxidy z pájeného spoje a pájky. Dále by mělo mít co nejstálější

fyzikální a chemické vlastnosti jak při skladování, tak při pájení, např. příznivá viskozita, povrchové napětí, hustota. Důležitým faktorem je také minimální tvorba zdraví škodlivých sloučenin, kovových par a plynů při pájení. Velkou roli také hraje snadná odstranitelnost zbytků po vychladnutí spoje. [1]

1.6.1.1. Složení tavidel

Tavidla se zpravidla skládají z několika složek, viz obr. 1.



Obr. 1 Složky tavidla [1]

Tavidlo bývá složeno z pevné složky (solidu) a kapaliny. Do tuhé fáze tavidla řadíme tavidlový nosič, aktivátory a aditiva. Kapalnou složku tvoří rozpouštědlo.

Tavidlové nosiče

Tavidlových nosičů je několik typů. Zřejmě nejstarší a dodnes používaná je pryskyřice z borovic, kalafuna (Rosin). Kalafunové tavidlo je agresivní v kapalném stavu, po zatuhnutí je inertní. I přesto se kalafunové tavidlo po pájení často čistí, při zahřátí desky by nezreagované tavidlo, případně tavidlové zbytky za vhodných podmínek mohly začít znovu reagovat a poškodit vodivé cesty. Dalším typem jsou tavidla na bázi syntetických případně modifikovaných přírodních pryskyřic (Resin).

V tavidlech s organickými kyselinami (Organic Acid) bývá zastoupena například kyselina citronová, mléčná, stearová.

Agresivnější varianta je využití anorganické kyseliny (Inorganic Acid) jako tavidlového nosiče. Používají se hlavně pro pájení oceli a slitin, které je obtížné pájet. V elektrotechnickém průmyslu nemají využití.

Tavidla na bázi kyselin jsou korozivní a po zapájení je nutný oplach. [1]

Aktivátory

Aktivátory jsou chemické sloučeniny, které zajišťují narušení a odstranění oxidů z povrchu pájeného spoje. Plní úlohu vytvoření snadno smáčitelného povrchu. Agresivnější aktivátory jsou např. soli minerálních kyselin, kyselina chlorovodíková. Ty ale podporují korozivní jevy, proto je nežádoucí, aby po pájení na desce zůstaly jejich zbytky. Méně agresivní jsou potom karboxylové, dikarboxylové kyseliny nebo aminokyseliny. Ty reagují s oxidy za zvýšené teploty, např. při předehřevu před pájením. Přehledné rozdělení tavidel dle nosiče a úrovně aktivace lze vidět v tabulce 2. [1]

Tabulka 2 Rozdělení tavidel dle J-STD-004 [1]

Tavidlový nosič	Míra aktivity tavidla	Hmotnostní procenta halidů	Typ tavidla	Značení tavidlo
Přírodní pryskyřice Rosin (RO)	Nízká	< 0,05 %	L0	ROL0
		< 0,5 %	L1	ROL1
	Střední	< 0,05 %	M0	ROM0
		0,5 – 2 %	M1	ROM1
	Vysoká	< 0,05 %	H0	ROH0
		> 2 %	H1	ROH1
Modifikovaná/syntetická pryskyřice Resin (RE)	Nízká	< 0,05 %	L0	REL0
		< 0,5 %	L1	REL1
	Střední	< 0,05 %	M0	REM0
		0,5 – 2 %	M1	REM1
	Vysoká	< 0,05 %	H0	REH0
		> 2 %	H1	REH1
Organická kyselina Organic (OR)	Nízká	< 0,05 %	L0	ORL0
		< 0,5 %	L1	ORL1
	Střední	< 0,05 %	M0	ORM0
		0,5 – 2 %	M1	ORM1
	Vysoká	< 0,05 %	H0	ORH0
		> 2 %	H1	ORH1
Anorganická kyselina Inorganic (IN)	Nízká	< 0,05 %	L0	INL0
		< 0,5 %	L1	INL1
	Střední	< 0,05 %	M0	INM0
		0,5 – 2 %	M1	INM1
	Vysoká	< 0,05 %	H0	INH0
		> 2 %	H1	INH1

Aditiva

Aditiva v tavidlech upravují jejich vlastnosti pro určité využití, např. rheologické modifikátory do pájecích past, stabilizátory pěny a antishlukovací činidla pro pájení vlnou. [1]

Rozpouštědla

Rozpouštědla usnadňují proces nanášení tavidla před pájením. Během přehřevu by se však měla odpařit. Pokud by se neodpařila, došlo by k odpařování tavidla při pájení, což by mohlo mít za následek rozstříkání pájky po desce pájeného spoje. Dělí se na organická na alkoholové bázi (VOC) a anorganická na bázi vody (VOC free). [1]

1.3. Pájení v ochranné atmosféře

Zavedení ochranné atmosféry do procesu pájení ovlivňuje spolehlivost pájeného spoje. Nejčastější plyn pro použití ochranné atmosféry je dusík, lze však použít i například argon. Pájení v běžné atmosféře má za důsledek rychlejší oxidaci spoje, vyšší tvorbu strusky apod. Dusíková atmosféra přináší výhodu hlavně v nákladech na údržbu a spotřebu pájecí slitiny, ochrání spoj před povrchovou oxidací, což vede k lepší smáčivosti a také zajistí lepší roztékavost pomocí snížení povrchového napětí povrchu slitiny. Pro pájení nebude potřeba taková aktivita tavidla, jako je tomu u běžné atmosféry. Dusík má také vyšší koeficient přenosu tepla. Jako nevýhody procesu mohou být vnímány spotřeba dusíku a vyšší cena zařízení pro ochrannou atmosféru. Při pájení v ochranné atmosféře je potřeba dosahovat

koncentrace zbytkového kyslíku v rozmezí přibližně 20-1000 ppm. V běžné atmosféře je kyslíku 21 %, což po přepočtu odpovídá 210 000 ppm. [15]

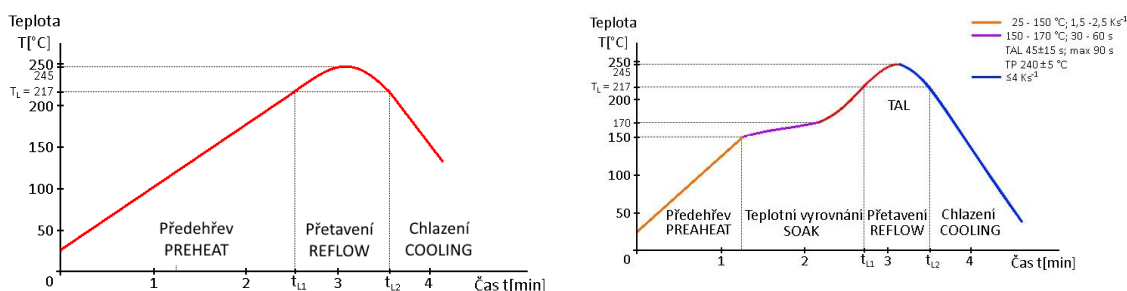
1.4. Pájení přetavením

Pájení přetavením spočívá v osazení součástek do pájecí pasty a následném přetavení při teplotě vyšší, než je teplota tání kuliček pájky v dané pájecí pastě. Výhody pájení přetavením jsou:

- úspora materiálu a přesně daný poměr pájky a tavidla – pájecí pasta se aplikuje pouze na předem definovaná místa DPS
- při pájecím procesu nedochází, na rozdíl od pájení vlnou, k teplotním rázům
- DPS lze osadit SMT součástkami z obou stran
- nedochází ke znečištění desky nečistotami, které se na pájený spoj mohou dostat např. při pájení vlnou
- při přesném technologickém postupu nanášení pájecí pasty můžeme docílit vyšší hustotu zástavby na DPS [5]

Proces pájení přetavením musí být nastaven co nejoptimálněji pro použité materiály, velikosti a typy pouzder součástek, hustotu zástavby a tepelnou kapacitu DPS. Profil lze rozdělit do 3 (RTS) nebo 4 (RSS) základní oblasti:

1. Předehřev (Preheat)
2. Vyrovnání teplot, aktivace (Soak)
3. Přetavení pájecí pasty (Reflow)
4. Chlazení (Cooling)[7]



Obr. 2 Porovnání RTS (vlevo) a RSS (vpravo) teplotních profilů [5]

Důležité aspekty teplotního profilu jsou T_{peak} (vrcholová teplota dané pájecí slitiny), TAL (doba nad liquidem – prodleva musí být taková, aby došlo k zapájení všech pouzder na desce). Dále je nutné správné nastavení teplotních gradientů při ohřevu a při chlazení – pro správnou aktivaci tavidla v pájecí pastě a vzniku požadované struktury pájeného spoje. [7]

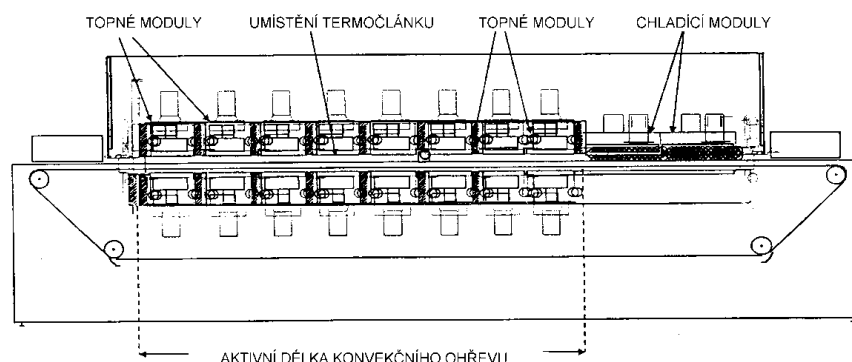
Nejvýznamnější metody pájení přetavením jsou – pájení infraohřevem, kondenzací a konvekční pájení.

Tabulka 3 Porovnání nejčastějších metod pájení přetavením [5]

Faktor	Infraohřev	Kondenzace	Konvekce
Řízení procesu	Dobré	Výborné	Velmi dobré
Pracovní teplota	Regulovatelná	Pevná	Regulovatelná
Homogenita pracovní teploty	Špatná	Velmi dobrá	Dobrá
Maximální teplota	Špatně definovatelná	Pevná	Špatně definovatelná
Univerzálnost	Ucházející	Velmi dobrá	Dobrá
Citlivost na barvu materiálu	Velká	Žádná	Malá

1.4.1. Konvekční pájení

Pájecí pece používají nejčastěji metodu nucené konvekce – ta spočívá v proudění plynu přes topná tělesa na danou DPS, jenž pecí projíždí na dopravníku (prstovém nebo pásovém). U některých typů pecí lze horký plyn usměrnit na předem určená místa pomocí naprogramovaných trysek. Pro bezolovnaté pájení se doporučuje použití pecí s minimálně 7 nezávisle řízenými teplotními zónami. Mezi výhody konvekčního pájení patří jednoduché nastavení pájecího profilu regulací rychlosti dopravníku nebo teplot v jednotlivých zónách, pece vyhovují i požadavkům vícevrstvých DPS a vyšším hustotám zástavby. Bez použití ochranné atmosféry však dochází k vyšší míře oxidace. [5]



Obr. 3 Schematické naznačení pájecí pece [5]

1.4.2. Pájení infraohřevem

Pájecí pasta se přetaví pomocí energie dodané IR zářiči. Absorpce tepla je silně závislá na barvě povrchu a vlnové délce záření (přičemž lze konstatovat, že absorpce klesá s rostoucí vlnovou délkou záření). Díky tomu může dojít k situacím, kdy součástky s tmavým povrchem bývají zahřívány více, než místa, na kterých se nachází pájecí pasta. To může mít negativní dopad na kvalitu zapájení a dané součástky také mohou být nadměrně tepelně namáhány. Infračervené pece pracují obdobně jako konvekční – osazená DPS je umístěna na dopravník a postupně projíždí několika zónami, ve kterých se nachází IR zářiče jak z horní, tak z dolní strany dopravníku. Teplotní profil opět můžeme regulovat pomocí teplot v jednotlivých zónách nebo rychlostí dopravníku. Proces IR pájení se vyznačuje velkou účinností (60 – 70 %), dochází však k velkým teplotním rozdílům na DPS – v důsledku nehomogenního

ohřevu různě barevných součástek a DPS a jejich materiálu. Proto se v praxi využívají pece s kombinací infračerveného ohřevu s přirozenou, případně nucenou konvekcí. [5]

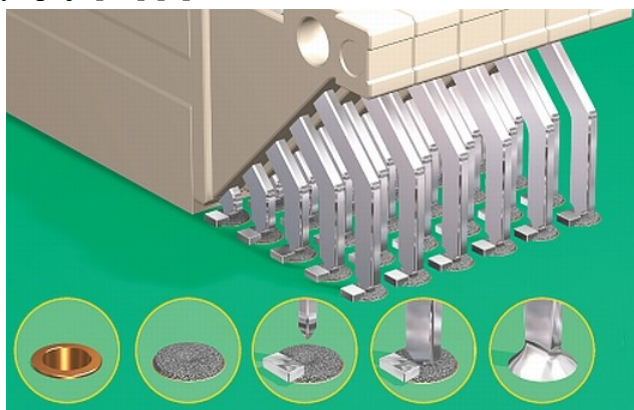
1.4.3. Kondenzační pájení

Kondenzační pájení neboli pájení v parách spočívá v ponoření osazené, předeřtá DPS do nasycených nebo částečně nasycených par. Použitá lázeň bývá na bázi fluorouhlíků, jejichž teplota varu udává pájecí teplotu. Pára při kondenzaci na chladnějších pájecích ploškách předává teplo desce plošných spojů. Při zahřátí DPS se součástkami osazenými do pájecí pasty na teplotu tavení pájecí pasty dochází ke vzniku pájeného spoje. Velkou výhodou pájení v parách je rovnoměrná teplota v celé lázni. Dále nedochází k oxidaci pájeného spoje, jelikož pájecí pára neobsahuje kyslík. Za nevýhodu může být považována omezená kompatibilita páry a některých součástek. Při pájení také dochází ke ztrátám páry a pájecí kapalina bývá drahá. [8]

1.4.4. Technologie Pin-In-Paste

Technologie Pin-In-Paste, známá také jako THR (Through hole reflow) spočívá v zapájení vývodových součástek v přetavovací peci. Pasta je natisknutá do pájecích otvorů a vývodové součástky jsou následně automaticky osazeny do pasty. Při přetavení se pájka v otvoru rozlije a díky smáčecím a kapilárním silám vytvoří pájený spoj vývod - otvor. [9]

Výhoda THR technologie spočívá v úbytku procesních kroků u kombinované montáže. Za další výhodu může být považována možnost vyšší hustoty zástavby na DPS – není potřeba více místa pro trysku selektivní vlny, případně maskování při pájení vlnou. Nevýhodou může být nutnost uzpůsobení součástek pro tuto technologii. Součástky musí vydržet vysoké teploty v přetavovací peci, navíc jejich vývody by měly být co nejkratší, aby nedocházelo k velké míře navztlínání na tyto vývody a tím pádem k nedostatku pájky v otvorech. S tímto problémem se musí počítat i při tisku pasty. Při THR technologii se tedy používají stupňovité šablony, které mají větší tloušťku u THT součástek, případně standardní šablony s větším poloměrem mezikruží. Možný je i dvojnásobný tisk – z primární a sekundární strany DPS, případně užití dvou šablon. Pokud je u pinů konektoru žádoucí ještě větší množství pasty, abychom předešli nedostatečnému zapájení, lze použít i pájkové preformy, jenž se automaticky osadí u pinů daného konektoru a při přetavování dodají potřebné množství pájky pro požadovaný pájený spoj. [10] [5]



Obr. 4 Použití pájkové preformy v technologii THR

1.5. Pájení laserem

Laserové pájení funguje na velmi podobném principu infračerveného pájení. K přetavení pájecí pasty, případně trubičkové pájky dochází bezkontaktní metodou pomocí fokusovaného laserového paprsku. Pro vznik kvalitního pájeného spoje je potřeba stejnoměrný světelný tok z optického systému. Při nestejnoměrném světelném toku může docházet k nedostatečnému prohřívání pájeného místa, což by mohlo způsobit defekty.[11]

I u laserového pájení je nutné dodržovat určitý teplotní profil, který lze rozdělit na fázi přehřevu, přetavení a chlazení. Velkou výhodou tohoto procesu je možnost použití pro obtížně přístupná místa na DPS, případně pájení citlivých součástek. Pro každý pájený spoj lze individuálně změnit parametry pájení – stopa paprsku a dávka dodané energie.[11]

Pro správnou reprodukovatelnost procesu je nutné znát výšku pájené DPS a kompenzovat její deformaci (např. prohýbání) v průběhu pájení. Kvůli tomu se velmi často do laserových pájecích zařízení vkládá senzor, jenž přesně měří vzdálenost DPS od optického systému. Při použití trubičkové pájky musí být do spoje dodáno pokaždé stejné množství pájky, navíc ve všech směrech, aby byl smočen celý vývod pájené součástky. [11]

Pro laserové pájení se využívají lasery:

- CO₂ laser – používá záření o vlnové délce okolo 10 μm . Energie laseru je pájecí slitinou absorbována dobře.
- Nd:YAG (Yttrium-Aluminium-Granát) – pracuje se zářením v oblasti vlnové délky okolo 1 μm . Absorpce tohoto záření pájkou je rovněž dobrá
- Diodový laser – vlnová délka záření okolo 0,8 μm , profil paprsku je pravoúhlý. Má velmi dobrou homogenitu záření, proto lze dobře nastavovat fáze teplotních profilů a směřovat jej i pod úhlem[5]

1.6. Ruční pájení

Při ručním pájení, stejně jako při hromadném strojním, jde především o co nejefektivnější přenos tepla pro vznik kvalitního pájeného spoje. Dále je nutné zvolit vhodné tavidlo a pájecí slitinu. Během pájení je potřeba dodávat do pájeného spoje trubičkovou pájku a také zajistit dobré prohřátí pájecích plošek. [5]

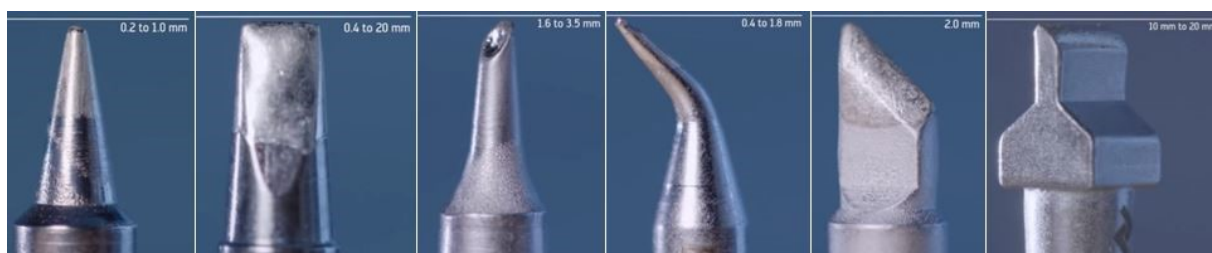
Pro ruční pájení lze použít 2 typy pájecích zařízení:

- Zařízení s regulovatelnou pracovní teplotou – teplotu snímá čidlo (např. termočlánek) umístěné v blízkosti pájecího hrotu.
- Zařízení s fixní pracovní teplotou – čidlo, taktéž umístěné v blízkosti pájecího hrotu, je schopné změnit magnetický stav po dosažení nastavené teploty – tím se odpojí topné těleso [5]

Pro vyhřívání hrotů se většinou používají keramická topná tělesa. Topná tělesa většinou bývají umístěna uvnitř pájecích hrotů. Správná volba pájecího hrotu je důležitá pro dobrý přenos tepla a vznik kvalitního pájeného spoje. Použitý hrot by měl co nejvíce odpovídat velikosti pájeného spoje a mít maximální kontaktní plochu. [13]

Typy hrotů:

- Špičatý hrot – vhodný pro velmi jemné pájení, zejména jednotlivých vývodů při malých roztečích
- Dlátkový hrot – univerzální pro většinu pájecích prací
- Hrot s minivlnou – nejvhodnější pro pájení vývodových součástek malých roztečí, lze s ním odsávat malé množství pájky
- Zahnutý hrot – využívá se pro ergonomické pájení, případně pájení obtížně dostupných pájených spojů
- Nožové hroty – optimální pro pájení PLCC součástek nebo konektorů
- Knotový hrot – Pro odstraňování zbytkové pájky velkého rozsahu



Obr. 5 Příklady pájecích hrotů [13]

Aby měly hroty co nejdelší životnost a nebylo nutné je příliš často měnit, doporučuje se držet co nejnižší pracovní teplotu, držet hrot pocínovaný a čistit jej od oxidů (například otíráním o drátěnku, alternativně navlhčenou houbičku), pájku aplikovat na pájené místo a ne na hrot samotný. S vyšší teplotou roste i rychlost oxidace a naopak se snižuje životnost pájecího hrotu. Při dlouhodobém působení vysoké teploty hrot oxiduje a stává se postupně nesmáčivým, případně špatně taví pájecí slitinu. Proto bývají pájecí stanice vybaveny režimem standby, kdy se při nepoužívání pájedla teplota sníží. Tím lze životnost hrotů prodloužit. Pájecí hroty lze regenerovat, např. pomocí pocínovacích tablet. [14]

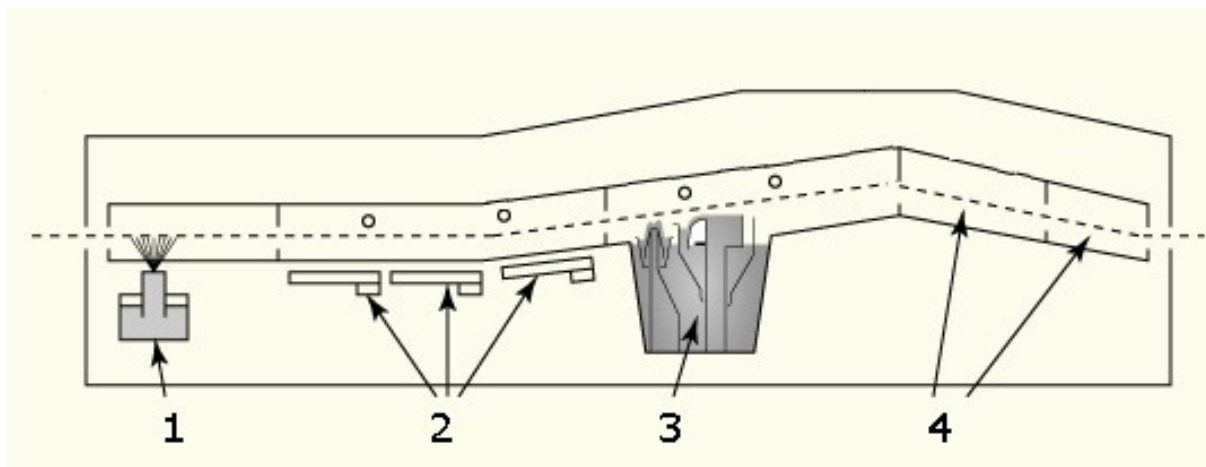
Robotické pájení

Z důvodu vyšších nároků na kvalitu bezolovnatého pájení se zavádějí také automatické pájecí stanice. Robotické pájení má velký vliv právě na reprodukovatelnou kvalitu pájeného spoje a rychlost zapájení komponent. Pájecí robot může nahradit stereotypní práci operátora a např. u pájení laserem se automatizovaná pracoviště zavádějí i z bezpečnostních důvodů. V praxi se využívají desktopová pájecí pracoviště, která spočívají v umístění portálového pájecího robota přímo na pracovní stůl. Pro náročnější aplikace se využívají víceosé (například šestiosé) pájecí systémy. Ty zaručují širší rozsah pohybu, proto se hodí i pro pájení v omezeném, případně členitém prostoru. Robotická zařízení lze zakomponovat do výrobní linky, případně z nich udělat samostatné výrobní buňky. [16]

1.7. Strojní pájení vlnou

Strojní pájení vlnou se používá pro zapájení vývodových součástek vsunutých do otvorů desky nebo při kombinované montáži, kde vývody klasické součástky jsou zasunuty z horní strany a na spodní straně jsou přilepeny SMD komponenty. Dochází však ke kontaminaci pájecí lázně, jelikož povrch DPS a pouzdra součástek bývají omyta roztavenou pájkou, která

díky vysoké teplotě rozpouští povrchy a jejich úpravy a sebe sama tak kontaminuje. Díky oxidaci povrchu pájky probíhá proces pájení většinou v ochranné dusíkové atmosféře, případně za přítomnosti pájecích olejů. [1]



Obr. 6 Schematické naznačení pájecí vlny [1]

1.7.1 Aplikace tavidla

Nejčastěji bývá tavidlo na DPS nanесeno sprejovou tryskou (obr. 1 – část 1), někdy za pomoci ultrazvuku. Výhoda sprejového nanášení je jednoduchá reprodukovatelnost procesu, menší spotřeba tavidla a minimální odpad. Mezi další možnosti patří např. pěnové, případně kartáčové nanášení. [1]

1.7.2. Předehřev desky

Deska na dopravníku projede několika zónami předehřevu (obr. 1.2). Využívá se několik typů předehřevu, např. infračervený, horkovzdušný zespod desky, případně i z horní strany. [1]

1.7.2.1 Infračervený předehřev

Infračervený tepelný zdroj vyzařuje okamžitě regulované tepelné záření. Také ohřívá přímo DPS a jen minimálně okolní vzduch. Problém IR předehřevu spočívá v nerovnoměrném ohřevu kvůli rozdílné absorpci infračerveného záření. Na krátkých vzdálenostech, případně vyšších rychlostech dopravníku se DPS nestihne dostatečně prohřát. [1]

1.7.2.2. Horkovzdušné předehřevy

Horkovzdušné konvekční předehřevy představují optimální řešení při oboustranné aplikaci i pro VOC-free tavidla. Jedná se o zařízení s topným tělesem ohřívajícím vzduch, jenž je pomocí ventilátoru vháněn do prostoru dopravníku s DPS. [1]

Předehřevy se při pájení používají pro eliminaci vzniku vad v důsledku teplotního šoku desky a součástek z následného pájení. Jelikož je teplotní rozdíl předehřátých pájených spojů a pájky mnohem nižší, než u DPS s pokojovou teplotou, urychlí se i samotný proces pájení. Vyrovnaná teplota na DPS je velice důležitá, jelikož spousta desek obsahuje tzv. studené zóny, což jsou napájecí a zemnicí plochy případně konektory, které by mohly způsobit nežádoucí únik tepla a zapříčinit tak nedostatečné prohřátí pájeného spoje. Rovnoměrné prohřátí DPS neovlivňuje pouze tepelná vodivost a tepelná kapacita součástek a desky

samotné, počet propojů a vrstev desky, ale i rychlost nárůstu teploty. Při rychlém nárůstu dojde k teplotním rozdílům a možným defektům. Dále přehřevy slouží k odpaření rozpouštědel a aktivaci tavidla.

Teplota přehřevu by se měla pohybovat okolo 90 °C – 110 °C, u tavidel na vodní bázi až 130 °C. [1]

1.7.3. Pájení vlnou

Dopravník s DPS přejede po vlně roztavené pájky (obr. 1 – část 3). Vlna je tvořena vyhřívanou vanou s roztavenou pájkou, čerpadlem, které tlačí roztavenou pájku z vyhřáté nádrže skrz trysku, která formuje tvar vlny. Pájka se nesmí dostat na horní stranu DPS, proto bývá výška vlny nastavena převážně do 2/3 tloušťky DPS. Nevýhodou pájecí vlny je tepelné namáhání součástek a postupné znečišťování vlny, k němuž dochází při styku pájky s pouzdry a kontakty pájených součástek. Ty obsahují různé kovy, které se během pájení v lázni rozpouští.

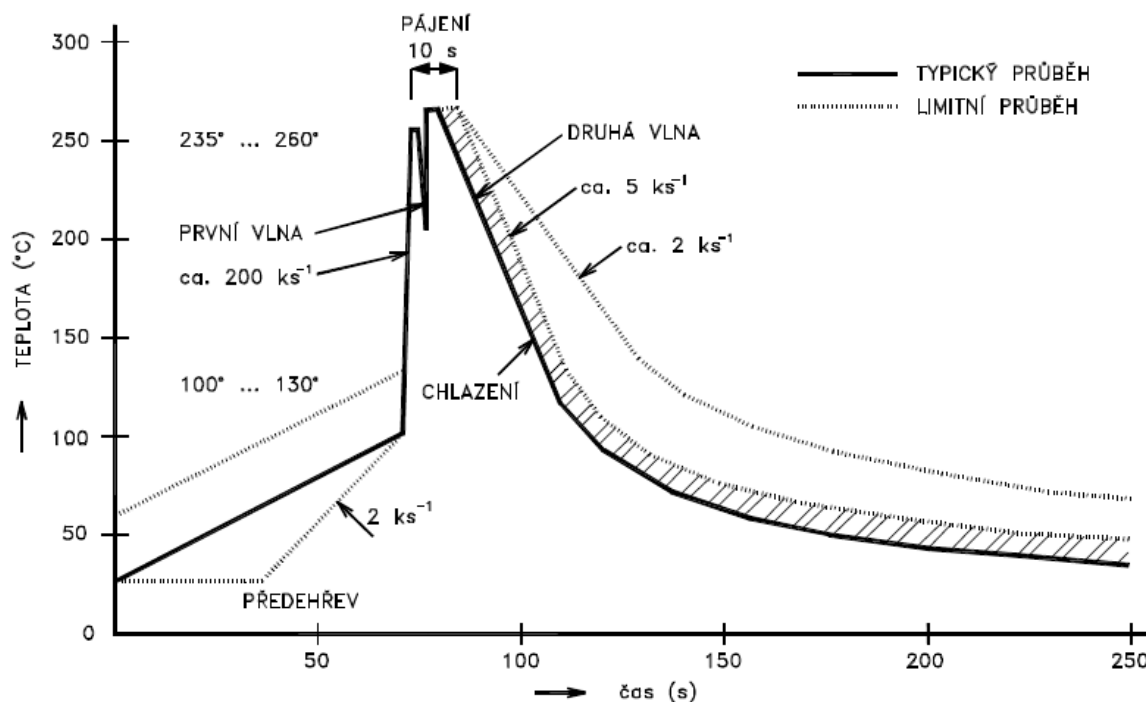
Vlna bývá buď jednoduchá pro vývodovou a jednoduchou kombinovanou montáž nebo dvojitá (čipová + klidná pro kombinovanou montáž), případně dutá [1]

1.7.3.1. Jednoduchá vlna

Jednoduchá vlna je nejjednodušší a lze jí pájet vývodové součástky i velmi vysoké integrace. Při ohnutých nebo příliš dlouhých vývodech mohou vznikat praporky, které lze odstranit např. sklonem dopravníku, případně přenastavením vlny. Touto vlnou lze pájet i SMT součástky, avšak pouze nižší hustotu zástavby DPS. [5]

1.7.3.2. Dvojitá vlna

U dvojité vlny první typ vlny (turbulentní, čipová) plní funkci smočení všech součástek pájkou. Pájka v turbulentní vlně proudí vysokou rychlostí, aby smočila i těžko dostupná místa na desce. Doba pájení na turbulentní vlně je přibližně 0,5 - 0,8 s. Druhá (laminární, klidná) vlna poté zajistí dokonalý meniskus s dostatkem pájky na ploškách. Pájení na klidné vlně probíhá 2 - 5 s. Ve dvojité vlně se nacházejí 2 čerpadla. Turbulentní vlna odstraní tzv. laminární stíny, což znamená eliminaci nedostatků klidné vlny při pájení DPS s vyšší hustotou zástavby SMD. Turbulentní a laminární vlna se nesmí navzájem ovlivňovat. [5]



Obr. 7 Teplotní profil dvojité vlny [5]

1.7.3.3. Dutá vlna

Výhodou této konstrukce je, že silný proud pájky stahuje DPS a pájené součástky směrem dolů. Tím odpadá problém přídavných držáků a ohýbání vývodů součástek. Dutá vlna má mnohem efektivnější přenos tepla, než jednoduchá. Kontakt mezi pájkou a součástkou tedy trvá 1 – 2 s. U duté vlny dochází k Bernoulliho efektu obtékání součástky. Tento jev nastává při dostatečném proudění slitiny. Vzhledem k vyšší rychlosti vlny (0,8 - 1,2 m/s) dochází k úplnému obtékání SMD. Tím docílíme perfektního zapájení SMD součástek bez přídavné vlny. [5]

1.7.3.4. Typy čerpadel

Čerpadla lze rozdělit na odstředivá a elektromagnetická. U prvního typu je výška pájecí vlny dána otáčkami motoru odstředivého čerpadla. U druhého typu čerpadel se pájka pohybuje pomocí magnetického toku a proudu procházejícího pájkou. U elektromagnetického čerpadla se pohybuje pouze pájecí slitina. Vlna s elektromagnetickým čerpadlem má lepší dynamické vlastnosti, navíc stačí menší obsah pájky v pájecí vaně. Nevýhodou je nutnost ochranného oleje pájky, případně dusíkové atmosféry. [5]

1.7.4. Chlazení

Chlazení je poslední operací strojního pájení vlnou. Pájený spoj musí chladnout dostatečně rychle, abychom dosáhli požadované struktury pájeného spoje a zamezili bychom tak vzniku nadměrného množství intermetalických sloučenin, které mají vliv na vodivost a mechanickou pevnost pájeného spoje. Během chladnutí by nemělo docházet k otřesům, mohlo by dojít k narušení spoje. [1]

1.7.5. Čištění

Pokud používáme agresivní tavidla, je nutné DPS po procesu pájení očistit a odstranit tavidlové zbytky. U vln s pásovým dopravníkem je nutné také mytí speciálních pájecích ráků. Pokud bychom zbytky neodstranili, mohlo by dojít ke korozi a zničení součástek, případně celé desky plošných spojů. U NoClean tavidel lze proces čištění vynechat, nicméně není na škodu. Při čištění je nutné brát v potaz technologickou použitelnost čisticího prostředku a jeho ekonomickou dostupnost, dále jeho toxicitu a případně správný proces likvidace v neutralizačních stanicích. [4]

Mytí probíhá ve speciálních myčkách, buď za pomoci ultrazvuku, případně pomocí karuselových zařízení. Nejefektivnějším se jeví oštrikový oplach. K čištění se používají buď freony, které jsou poměrně účinné pro odstranění tavidel na bázi pryskyřice. Jejich používání je však vázáno s přísnými předpisy pro ochranu životního prostředí. V mnoha zemích jsou freonová mycí média dokonce zakázána. Další variantou pro mytí DPS a pájecích ráků jsou na bázi vody, jenž pro oplach VOC tavidel, taktéž na vodní bázi, stačí. Pro tyto myčky se uplatňuje mytí v kaskádových pračkách, v poslední lázni je již pouze destilovaná voda. Součástí myček může být také vzduchový nůž, jenž po konečném oplachu horkým vzduchem odstraní mycí kapaliny z povrchu DPS. [4]

1.7.6. Selektivní pájení vlnou

Při selektivním pájení vlnou se užívá speciálních maskovaných pájecích ráků, případně masek upnutých do univerzálního pájecího rámu. Masky bývají zhotoveny zpravidla z FR-4 materiálu, který má vysokou teplotu T_g. Maskovat lze místa na deskách, u kterých není žádoucí kontakt s roztavenou slitinou (např. hrany DPS, které se používají pro zasunutí do konektorů) i samotné SMD součástky. Tato metoda selektivního pájení se velmi hodí pro velkoobjemovou výrobu, jelikož má velmi krátký čas pájení, je však málo flexibilní a nese s sebou výrazná technologická omezení. [15]



Obr. 8 Pájecí maska užitá v praktické části (vlevo horní strana, vpravo spodní strana s DPS)

1.8. Pájení pomocí selektivní trysky

Pájení selektivní tryskou se užívá v situacích, kdy nelze použít pájení vlnou, například pokud jsou vývodové součástky osazeny z druhé strany DPS. Další využití můžeme najít u použití tepelně citlivých součástek na desce. Kvůli nim desku plošných spojů nelze pájet vlnou, proto se pájí selektivní tryskou, dochází pouze k lokálnímu ohřevu některých míst DPS. [17]

Principiálně je pájení selektivní tryskou shodné s pájením vlnou, tavítko se však nanáší pouze postřikovým fluxerem na přesně zvolená místa DPS. Následuje přehřev desky (horkovzdušný, případně IR) a přejezd nad miniaturní pájecí trysku, která taktéž zapájí pouze požadované body. [17]

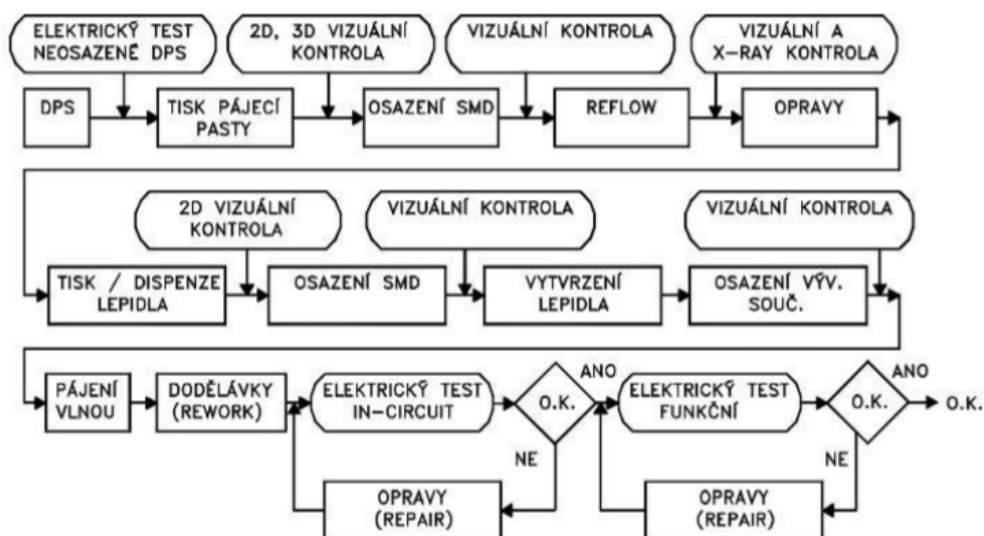
Pájecí trysky mohou být dvojího typu:

- Nesmáčivá tryska – roztavená pájecí slitina vytéká z trysky pouze jedním definovaným směrem. Vyznačuje se velmi dobrým přenosem tepla a tedy i kratším časem pájení, DPS však musí být pro tento typ trysky vhodně navrhnutá
- Smáčivá tryska – pájecí slitina se rovnoměrně roztéká po celé ploše trysky. Pomocí těchto trysek lze zapájet i malé komponenty a hůře dostupná místa na DPS. V praxi se využívají trysky s vnitřním průměrem min 2 mm. Údržba pájecích trysek je totožná s údržbou pájecích hrotů - pocínování, regenerace pomocí pocínovacích tablet, případně poprášení práškovou kyselinou (např. kyselina adipová)

Velikou výhodou selektivního pájení je vysoká flexibilita procesu, naproti tomu bývá u tohoto typu procesu dlouhý čas pájení. Proto se tento proces hodí spíše pro prototypovou/malosériovou výrobu. [18]

2. Kontrola kvality

Kontrola jakosti by se měla používat ve všech procesech výroby desek plošných spojů. Veškeré kontroly se řídí normami, českými, evropskými, případně americkými. Cíl kontroly a testování je správné osazení a zapájení desek plošných spojů a tím zajištění jejich spolehlivé funkce. Kontroly lze rozdělit na vstupní, mezioperační a výstupní. [5]



Obr. 9 Schéma s doporučenými mezioperačními kontrolami při výrobě DPS [5]

Vstupní kontrola ověří dodaný materiál, zda vyhovuje normám a požadavkům výroby. Pro zvýšení spolehlivosti výrobního procesu se zavádějí mezioperační kontroly. Výstupní kontroly záleží na požadavcích zákazníka a interní výrobní dokumentace podniku. Na obrázku 5 je schematicky vyobrazeno doporučení zavedení kontrol. Po pájení vlnou většinou také následuje vizuální kontrola (touch-up). Normy zabývající se kontrolami jsou např. IPC-A-600H (*Acceptability of Printed Boards*), IPC-TM-650 (*Test methods manual*) a IPC-A-610 (*Acceptability of Electronics Assemblies*). Dle normy IPC-A-610E lze montážní sestavy rozdělit do 3 tříd podle aplikace sestav a kritéria přijatelnosti jsou rozdělena do 4 úrovní. [5]

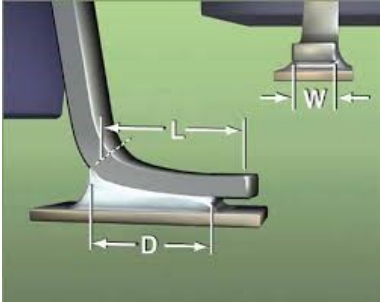
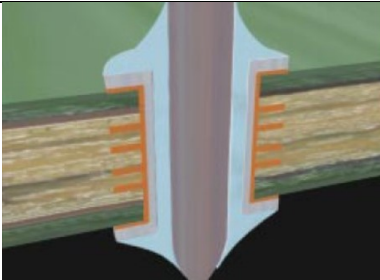
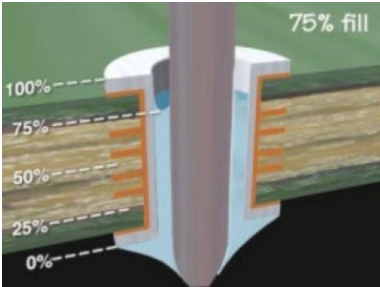
Třídy oblasti použití: [6]

- Třída 1: Elektronické výrobky pro obecné použití
 - Výrobky vhodné pro aplikace, kde je hlavním požadavkem funkčnost sestavy
- Třída 2: Elektronické výrobky pro specializované použití
 - Výrobky, u kterých je požadován nepřetržitý výkon a prodloužená životnost, je žádoucí nepřetržitý výkon výrobku, ale tento není kritický
 - Typické pracovní prostředí u uživatele by nemělo způsobit selhání
- Třída 3: Elektronické výrobky pro kritické aplikace
 - Výrobky, kde má nepřetržitý výkon kritickou důležitost, odstavení zařízení není tolerováno, i když prostředí konečného použití může být mimořádně nepříznivé a zařízení musí fungovat v podmínkách, jako je záchrana života, podpora životních funkcí, případně v jiných kritických systémech

Čtyři úrovně kritérií platící pro každou třídu: [6]

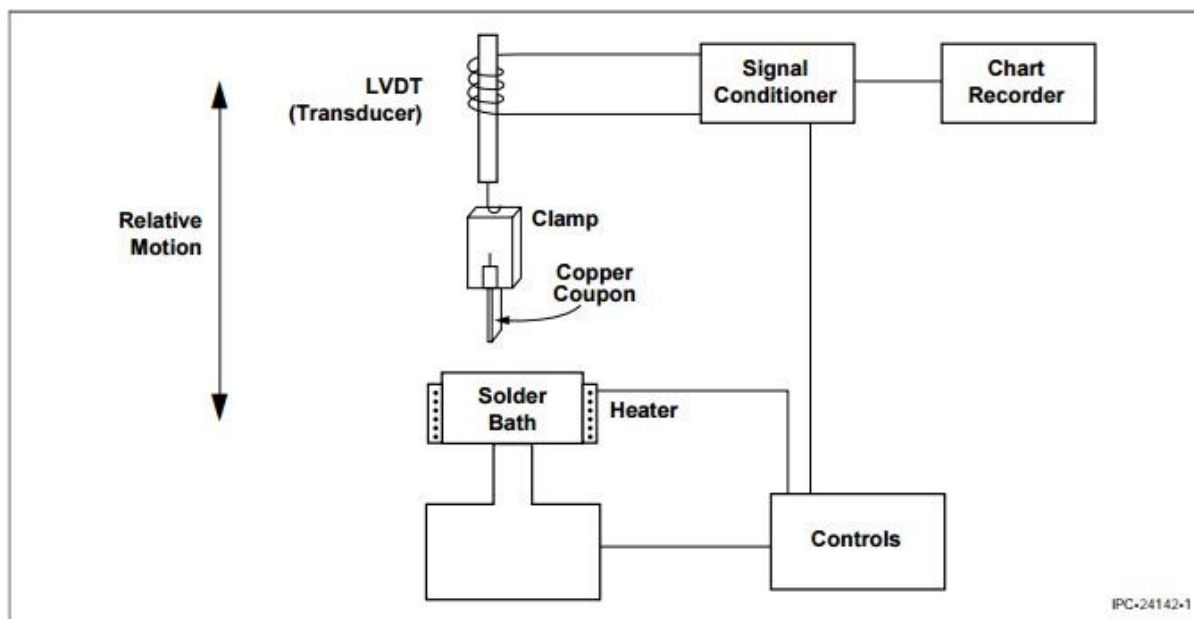
- Cílový stav
 - Žádoucí, stav blízký dokonalosti
 - Není vždy dosažitelný, nemusí být nutný pro zajištění spolehlivosti sestavy v provozním prostředí
- Přijatelný stav
 - I když tento stav není nezbytně dokonalý, zajistí integritu a spolehlivost sestavy v provozním prostředí
- Závadový stav
 - Nepostačuje na zajištění rozměrů, nastavitelnosti nebo funkce sestavy v prostředí, pro které je sestava určena
 - Je stanoven výrobcem na základě výkresů, servisu a požadavků zákazníka.
 - Možnosti nakládání s tímto výrobkem jsou rework – přepracování, repair – oprava, scrap – odpad. Pokud by měl být výrobek použitý v takovém stavu, v jakém je, může být požadován souhlas zákazníka
- Stav indikace odchylky
 - Určuje charakteristiku, jež neovlivní rozměry, sestavitelnost nebo funkci výrobku

Tabulka 4 Příklad kritérií přijatelnosti podle normy IPC-A-610E [6]

 <p>Obr. 10 Chybně zapájený vývod [6]</p>	<p>Přijatelné – Třída 1</p> <ul style="list-style-type: none"> Minimální délka spoje (D) se rovná šířce vývodu (W) nebo 0,5 mm, podle toho, která hodnota je menší. <p>Přijatelné – Třída 2, 3</p> <ul style="list-style-type: none"> Když je délka paty (L) větší, než tři (W), minimální boční délka spoje (D) se rovná nebo je větší, než tři (W) nebo 75 % (L), podle toho, co je větší Když délka paty (L) je menší, než 3 (W), (D) se rovná 100 % <p>Závada – Třída 1</p> <ul style="list-style-type: none"> Minimální boční délka spoje (D) je menší, než šířka vývodu (W) nebo 0,5 mm, podle toho, která hodnota je menší <p>Závada – Třída 2, 3</p> <ul style="list-style-type: none"> Když délka paty (L) je větší, než 3 (W), minimální boční délka spoje (D) je menší, než tři šířky vývodu (W) nebo 75 % (L), podle toho, který rozměr je delší Když délka paty (L) je menší, než tři (W), (D) je menší, než 100 % (L)
 <p>Obr. 11 Požadovaný stav zapájení [6]</p>  <p>Obr. 12 75 % úroveň zapájení vývodu [6]</p>	<p>Cíl – Třída 1, 2, 3</p> <ul style="list-style-type: none"> Výplň dosahuje 100 % <p>Přijatelné – Třída 1, 2, 3</p> <ul style="list-style-type: none"> Minimální výplň je 75 %. Celkové dovolené maximum pro prohlubně je 25 %, zahrnující primární i sekundární stranu DPS <p>Nespecifikováno – Třída 1, Přijatelné – Třída 2, Závada – Třída 3</p> <ul style="list-style-type: none"> Jako výjimka je povolena 50 % vertikální výplň průchozích pokovených otvorů pro Třidu 2, pokud jsou splněny následující požadavky: Průchozí pokovený otvor je připojen k teplovodivým nebo vodivým plochám, které slouží jako chladiče Vývod komponentu je rozeznatelný na straně pájky Pájková výplň na straně pájky musí smáčet stěnu pokoveného otvoru a vývodu v úhlu 360°

2.1. Testování smáčivosti

Testování smáčivosti probíhá na meniskografu metodou smáčecích vah. Tato metoda je vhodnější pro testování smáčení vývodových součástek, nicméně je možné ji využít i pro SMD. Průběh měření spočívá v ponoření vývodu s naneseným tavidlem do nádoby s roztavenou pájkou. Vzorek je zavěšený na citlivých mikrováhách a nádoba s pájkou se k němu přibližuje na zdvihacím mechanismu, dokud nedojde k ponoření vývodu do definované hloubky. Schéma meniskografu je naznačeno na obr. 13. [1]



Obr. 13 Meniskograf [1]

Při styku vzorku s roztavenou pájkou je teplota vzorku nízká, aby mohlo dojít k dobrému smáčení, proto musí být vzorek vtlačen větší silou. Po prohřátí vzorku začne pájka smáčet vzorek a s postupem času začne táhnout vzorek do sebe, proto je poté nutné vyvinout určitou sílu na jeho vytažení. Protože na ponořený vývod do pájky působí také vztlačková (Archimédova) síla, která vytlačuje vývod z roztavené pájky, proto je nutné ji odečíst podle rovnice:

$$F = \gamma * p * \cos\varphi - g * \rho * V \quad (1)$$

kde:

F - smáčecí síla (N)

γ - povrchové napětí roztavené pájky (N.m⁻¹)

p - obvod vzorku (m)

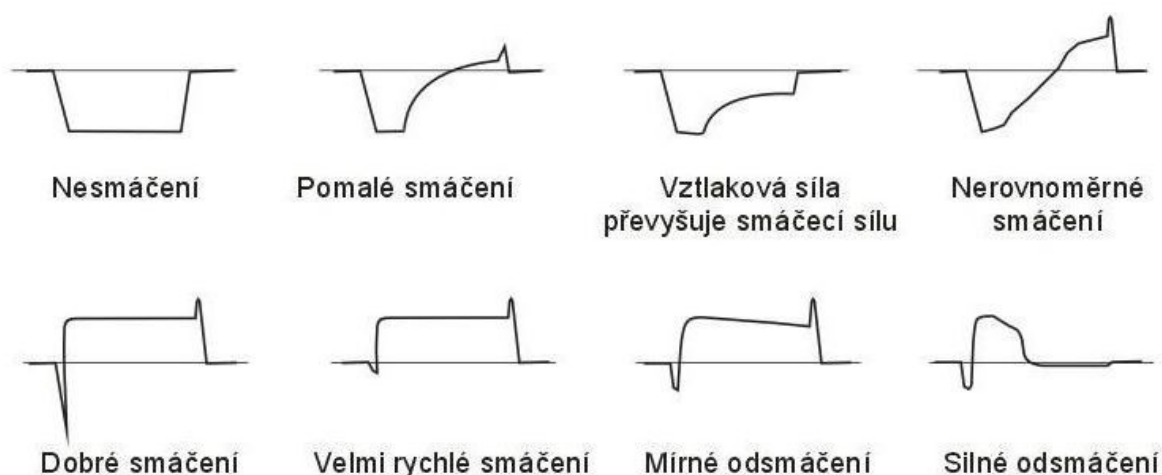
g - gravitační zrychlení (m.s⁻²)

V - objem ponořené části vzorku

ρ - hustota pájky

φ - smáčecí úhel [1]

Průběhy smáčení mohou nabývat různých podob - viz obr. 14



Obr. 14 Závislost smáčecí síly na čase [1]

2.2. Konduktometrické metody zjišťování čistoty

Konduktometrických metod je více typů, například SEC - Solvent Extract Conductivity, metoda ROSE - Resistivity Of Solvent Extract, která se dále dělí na statickou a dynamickou. Pro měření se využívá různých zařízení - ionograf, omegametr, kontaminometr. [1]

Nečistoty na vzorku se zjišťují pomocí vyluhování znečištěné desky v roztoku izopropylalkoholu a deionizované vody v poměru 3:1. Počáteční hodnota vodivosti čistého měřicího roztoku by neměla přesáhnout $0,05 \mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$. Kontaminace desky se udává v mikrogramech chloridu sodného na centimetr čtverečný plochy desky a vypočte se podle následující rovnice: [1]

$$Z_{PS} = \frac{(\gamma_1 - \gamma_0) \cdot V}{S \cdot k_9} \quad (2)$$

kde:

Z_{PS} - kontaminace DPS ($\mu\text{gNaCl}\cdot\text{cm}^{-2}$)

γ_0 - počáteční vodivost roztoku ($\mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$)

γ_1 - konečná vodivost roztoku ($\mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$)

V - objem roztoku (cm^3)

S - plocha desky (cm^2)

k_9 - směrnice vodivosti roztoku při naměřené teplotě

Tato metoda je nedestruktivní a vhodná pro:

- kontrolu procesu čištění linek
- testování čistoty např. podle normy IPC
- testování čistících procesů [1]

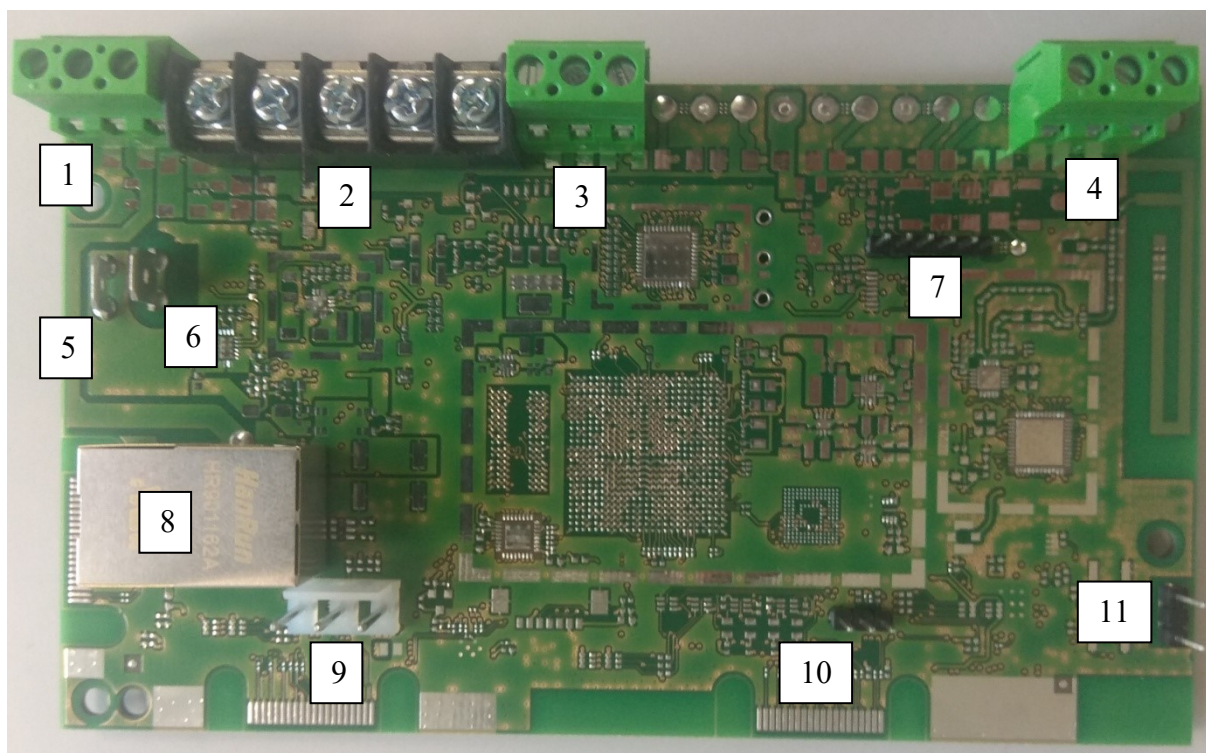
3. Praktická část s diskuzí dosažených výsledků

3.1. Definované cíle

- Seznámení se s problematikou selektivního pájení
- Seznámení se s pájecími zařízeními pro možnosti selektivního pájení
- Návrh optimálního technologického řešení pro konkrétní produkt
- Provedení praktických zkoušek selektivního pájení na daných zařízeních
- Otestování smáčivosti vývodů s tavídky použitými pro výrobu daného produktu
- Zhodnocení kvalitativních, technologických a ekonomických aspektů

3.2. Popis DPS použité pro testování

DPS použitá pro testování je 4-vrstvá z materiálu FR-4. DPS je určena pro kombinovanou oboustrannou montáž. Povrchová úprava pájecích plošek byla zvolena HAL. Na horní i spodní straně jsou po SMT montáži upevněny shieldy pro stínění a ochranu BGA a QFN komponent. Po SMT montáži se do pokovených otvorů osadí vývodové součástky, které je potřeba selektivně zapájet. Vzhledem k velikosti otvorů a zvoleným konektorům není možná technologická metoda Pin-In-Paste, konektory nejsou natolik teplotně odolné, aby vydržely průchod reflow pecí, navíc design DPS není pro tuto metodu vhodný. Pro selektivní pájení vlnou musí být zhotoven maskovací pájecí rám (viz obr. 8), jenž zakryje jak SMT součástky a shieldy, tak pokovené otvory pro součástku, jenž se bude doosazovat a pájet ručně z druhé strany DPS. Tato součástka pro testování nebyla brána v potaz. Další možnost selektivního pájení je pomocí selektivního zařízení EBSO SPA250 pro pájení selektivní tryskou. DPS bude upnuta do univerzálního rámu a zapájena selektivně podle vytvořeného pájecího programu. Ruční pájení nebylo testováno vzhledem k možným proměnlivým výsledkům (lidský faktor).



Obr. 15 Testovaná deska – osazená vývodovými součástkami a zapájená

Tabulka 5 Popis vývodových součástek použitých pro testování

Číslo	Popis	Značení
1	Šroubovací konektor zelený, 3 piny	Con1
2	Šroubovací konektor černý, 5 pinů	Con_velky
3	Šroubovací konektor zelený, 3 piny	Con2
4	Šroubovací konektor zelený, 3 piny	Con3
5	Faston	Fast1
6	Faston	Fast2
7	6 pinový konektor malý	6pin
8	LAN konektor RJ45 stíněný	RJ
9	3 pinový konektor velký, bílý	3pin_velky
10	3 pinový konektor malý	3pin_maly
11	2 pinový konektor malý	2pin

3.3. Testovaná zařízení

3.3.1. Vlna 1 (Vitronics Soltec Delta 5)

První zařízení užívané pro testování je pájecí vlna značky Vitronics. Pájecí zařízení se skládá z prstového dopravníku, fluxeru, 3 předehřevných zón a vyhřívané vany s pájecí vlnou. Pro pájení je použita pouze laminární pájecí vlna, čipová vlna v zařízení není zavedena.

Systém nanášení tavidla funguje na principu vhánění tavidla z přetlakové nádrže do trysky pomocí regulátoru průtoku a je rozptylován tlakovým vzduchem. Pro fluxování je použito VOCfree No-Clean tavidlo se 4,5 % solidů klasifikováno jako ORL0. [12]

Následují zóny předehřevu. První zóna je realizována pomocí sálání tepla z topných těles pod dopravníkem. Druhou, také spodní, předehřevnou zónu tvoří horkovzdušné ventilátory. Třetí zóna DPS předehřeje ze spodní strany opět horkým vzduchem a z horní strany pomocí infrazářičů.

Pro samotné pájení je využito slitiny SN100C. Ve vlně se nachází feeder, který průběžně pomocí plováku kontroluje hladinu pájecí slitiny ve vlně a v případě potřeby pájkové tyče automaticky doplní. Chladicí ventilátory se ve vlně nenacházejí.



Obr. 16 Pájecí vlna Vitronics Soltec Delta 5

3.3.2. Vlna 2 (Ersa Powerflow)

Druhé zařízení podrobené testu je pájecí vlna Ersa Powerflow. Průjezd zařízením je realizován také prstovým dopravníkem, vlna je vybavena sprejovým fluxerem s průtokoměrem pro lepší monitorování množství aplikovaného tavidla. Tavidlo je na DPS nanášeno tryskou a rozháněno tlakovým vzduchem. Pro pájení na této vlně se užívá stejné tavidlo jako ve vlně 1. Ve vlně je možné naprogramovat místa, na která se má tavidlo nanášet,

tato funkce však pro testování použita nebyla. Vlna má 3 předehřevné zóny – první zóna je tvořena spodním předehřevem, kde z topného tělesa sálá horký vzduch (typ Calrod) a z horný strany je DPS předehřívána horkovzdušným ventilátorem. Druhá zóna je pouze spodní horkovzdušný ventilátor. Poslední zóna je realizována IR předehřevem též pouze ze spodní strany. Zařízení má jak laminární, tak klasickou čipovou vlnu. Ve vyhřáté vaně s pájecí slitinou SN100C se nachází čidlo, které kontroluje hladinu pájky a feeder, který v případě nízké hladiny slitinu doplní. Za vlnou je instalovaný tunel s ventilátory pro ochlazení desky po zapájení.



Obr. 17 Pájecí vlna Erska Powerflow

3.3.3. Vlna 3 (Erska Powerflow e N2)

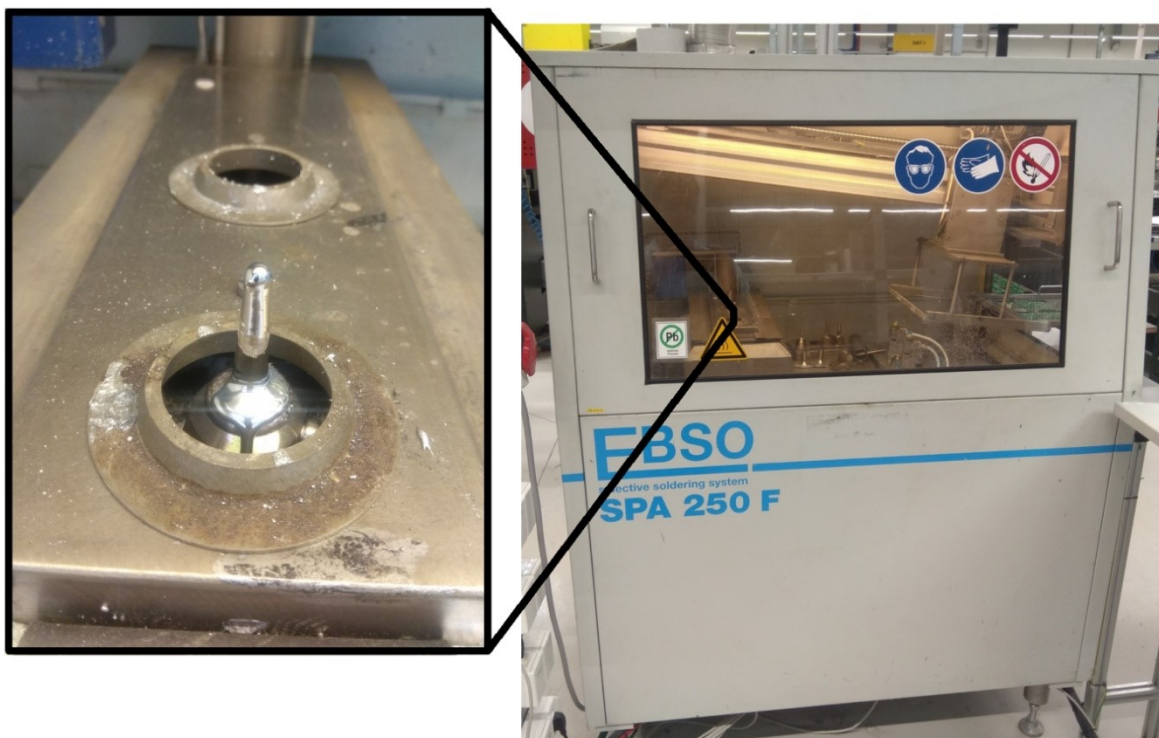
Poslední vlna pro testování selektivního pájení je též značky Erska, konkrétně Powerflow e N2. Vlna je vybavena řetězovým dopravníkem, proto na ni musí být uzpůsobeny i pájecí rámy. Princip nanášení tavidla je shodný s vlnou 2. Tavidlo využívané v této vlně je klasifikováno jako ORL0 VOCfree NoClean s 3,6 % sušiny. Pro předehřev desky jsou ve vlně 2 předehřevné zóny s topnými tělesy (typ Calrod) a pro třetí předehřevnou zónu jsou opět využity IR zářiče. Horní předehřev se v tomto zařízení nenachází. Samotné pájení probíhá pomocí čipové vlny a Wortmannovy pájecí trysky, ta má výhodu oproti klasické laminární vlně, z konstrukčních důvodů na ní lze nastavit delší kontaktní dobu DPS s pájkou, tudíž lepší prohřátí spoje. Vlna není vybavena chladicími ventilátory, na výrobní lince je k ní přidán kartáčovací válec na očištění DPS a pájecích rámců. Fluxovací, předehřevný a pájecí zóny jsou tunelem se systémem clonek a pájení probíhá v inertní dusíkové atmosféře se zbytkovým kyslíkem 500 ppm.



Obr. 18 Pájecí vlna Ers Powerflow e N2

3.3.4. Selektivní zařízení EBSO SPA250F

Pájecí zařízení s lokální tryskou EBSO je vybaveno dvěma sprejovacími tryskami, které nanášejí postřikem tavidlo na předem naprogramované body na DPS. Zařízení není vybaveno žádným předehřevem, bezprostředně po nanesení tavidla na DPS tak následuje zapájení předem daných míst na DPS. Pájení probíhá pomocí pájecích trysek. V zařízení jsou pájecí trysky dvě, nejdou však používat nezávisle, slouží pouze k zapájení dvou naprosto stejných DPS a tím ke zkrácení výrobního času na polovinu. Tavidlo použité v zařízení EBSO je na alkoholové bázi, která je vzhledem k absenci předehřevů vhodná, tavidlo na vodní bázi potřebuje mnohem vyšší teploty pro aktivaci a odpaření. Klasifikace tavidla je ORL0, jedná se o No - Clean tavidlo s 1,85 % sušiny. Pro pájení se používají smáčené trysky o vnitřním průměru 2 – 10 mm. Pro testování byla použita pouze jedna tryska – viz obr. 19.



Obr. 19 Selektivní pájecí zařízení EBSO a pájecí tryska použitá pro testování

3.4. Produkční testování

3.4.1. Programy použité pro produkční test

Pro produkční testování byly na vlnách nastaveny a odladěny pájecí programy s parametry vyobrazenými v tabulce níže.

Tabulka 6 Finálně nastavené parametry pájecích vln

Parametr	Vlna 1	Vlna 2	Vlna 3
Rychlost dopravníku	110 cm/min	110 cm/min	140 cm/min
Výkon fluxeru	100 mbar Obousměrně	28 % Obousměrně	40 % Obousměrně
1. předehřevná zóna	400 °C	Horní 200 °C (50 %) Spodní 210 °C (50%)	325 °C
2. předehřevná zóna	140 °C, 30 ot/s	320 °C	320 °C
3. předehřevná zóna	Horní IR 60 % Spodní 150 °C (30 ot/s)	IR 60 %	IR 70 %
Výkon čipové vlny	-	62 %	355 ot/min
Výkon laminární vlny	330 ot/min (maximum)	90 %	395 ot/min
Zbytkový kyslík (inertní atmosféra)	-	-	500 ppm

U vlny 1 bylo zjištěno, že danou DPS na zařízení nelze vyrobit, kvůli vysokému počtu defektů.

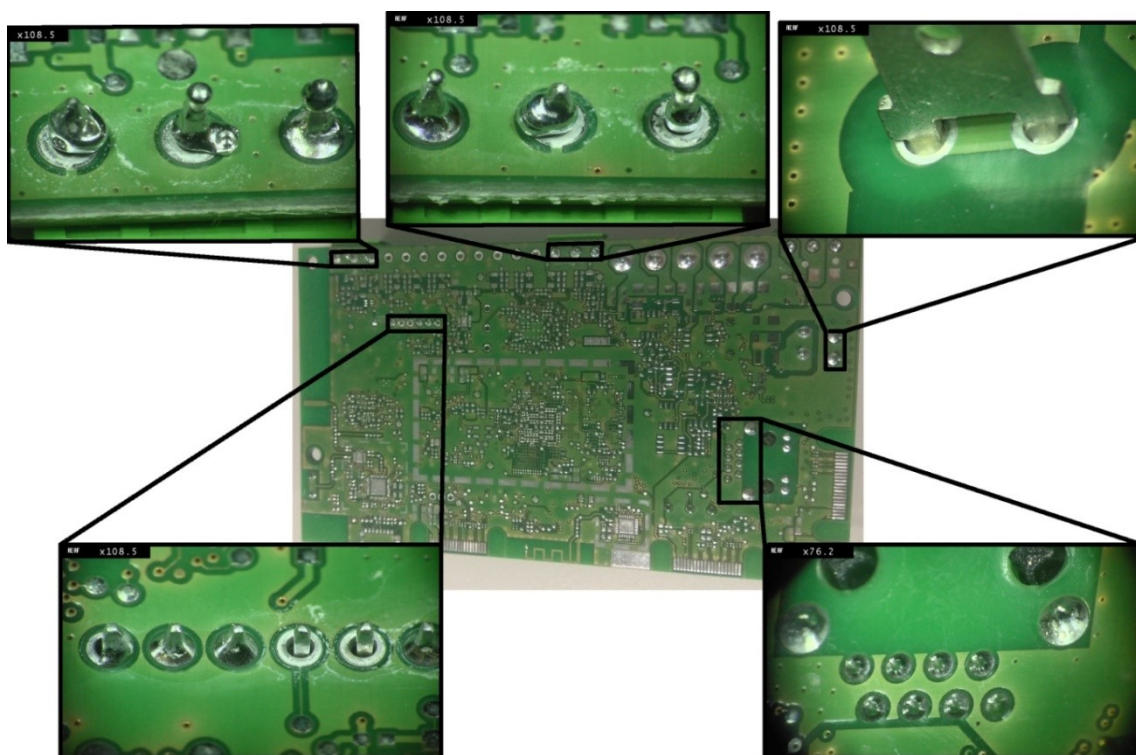
Vzniklé defekty byly:

- Příliš málo navzlínaná pájka u fastonů Fast1, Fast2
- Nezapájené zelené konektory Con1, Con2, Con3
- Mnoho bublin u větších vývodů konektoru RJ
- Nezapájené piny u 6pin konektoru
- Žádný kontakt pájky se součástkou 3pin_maly

DPS byla pravděpodobně málo prohřátá a vývody s prokovenými otvory měly nedostatečnou kontaktní dobu s pájkou pro správný vznik pájeného spoje. Na nedostatečné prohřátí DPS měla vliv zejména absence čipové vlny, pro lepší výsledky by bylo potřebné změnit parametry přehřevných zón, což by mělo dopad na celou produkci v tomto zařízení, případně snížit rychlost dopravníku, což by snížilo výrobní kapacitu stroje a to v současné době nelze.

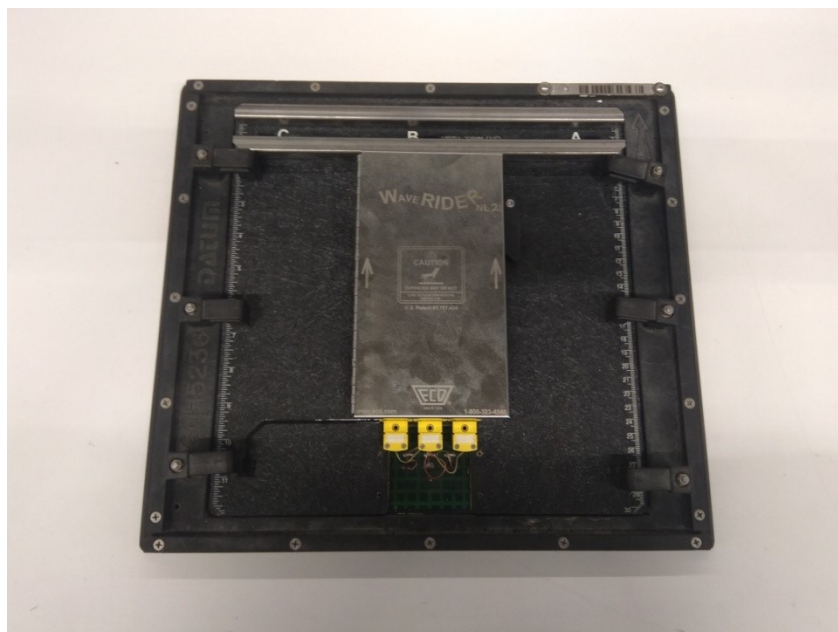
Vzhledem k nemožnosti výroby daného produktu byla vlna 1 vyřazená z dalšího testování, ale byla proměřena stabilita pájecího procesu tohoto zařízení (kapitola 3.8.).

Deska z vlny 1 s detaily defektů je vyobrazena na obrázku 20.

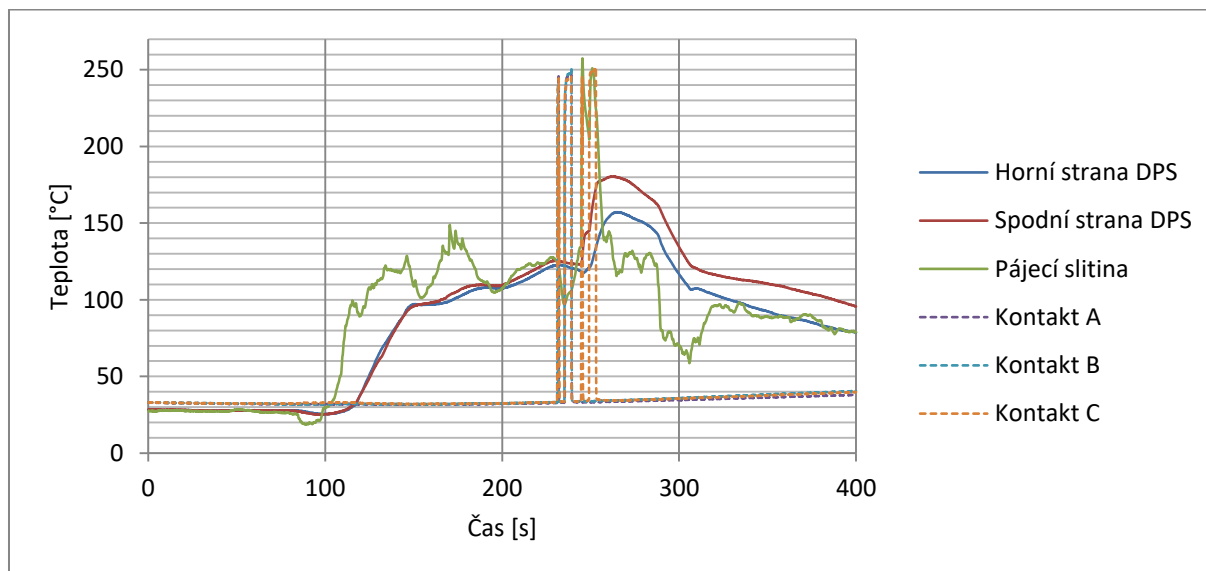


Obr. 20 Deska vyrobená na vlně 1

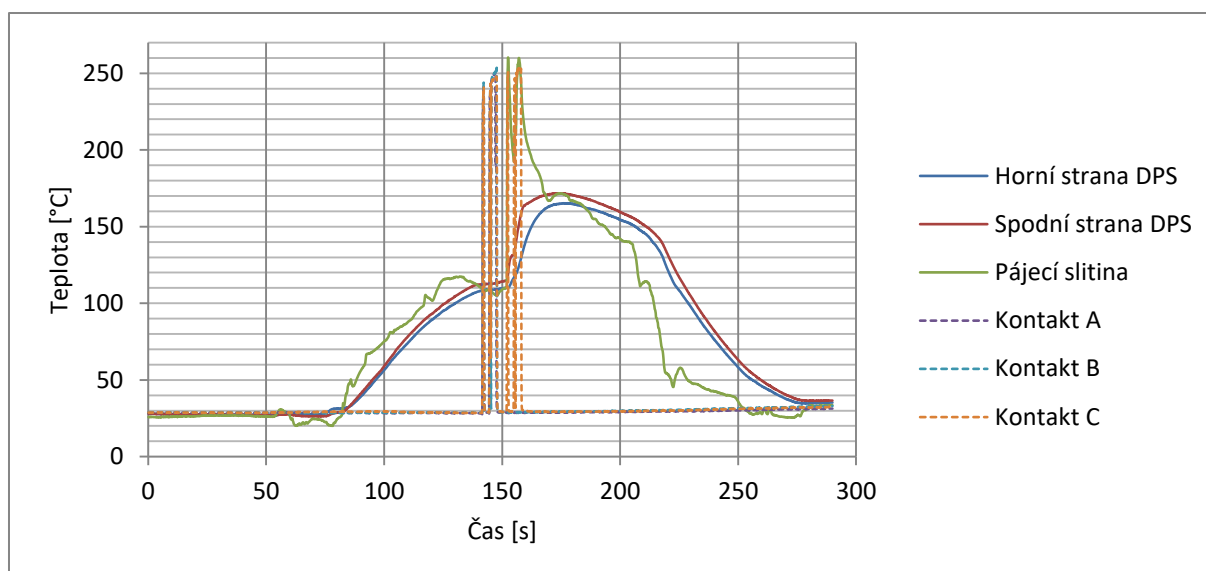
Finální nastavení programů dalších vln byly změřeny zařízením WaveRider. Zařízení se běžně používá pro ověření stability procesu pájení vlnou. Pomocí elektrického propojení kontaktů (A, B, C, viz obrázek 21) s pájkou WaveRider změří kontaktní dobu s pájkou, rychlost dopravníku a díky termočlánkům upevněným na destičce z materiálu FR-4 v zadní části je schopné změřit teploty při jednotlivých podprocesech na horní a spodní straně desky, ať už zón přehřevu nebo pájecí slitiny.



Obr. 21 Měřicí zařízení WaveRider



Graf 1 Naměřený teplotní profil vlny 2



Graf 2 Naměřený teplotní profil vlny 3

U vlny 2 lze pozorovat vliv horkovzdušných přehřevů na křivce „Pájecí slitina“. Vzhledem k tomu, že je termočlánek odhalený a sám o sobě má minimální tepelnou kapacitu, je průběh značně roztřesený, kdežto u vlny 3 tento jev nenastal – přehřevy zde fungují pouze na principu sálání tepla. U obou vln je vidět fáze nanášení tavidla – došlo k mírnému ochlazení DPS.

Kontaktní časy, přepočtené kontaktní délky DPS s pájecí slitinou a paralelnost vln byly vyneseny do tabulek níže.

Tabulka 7 Kontaktní doby a kontaktní délky v čipové vlně

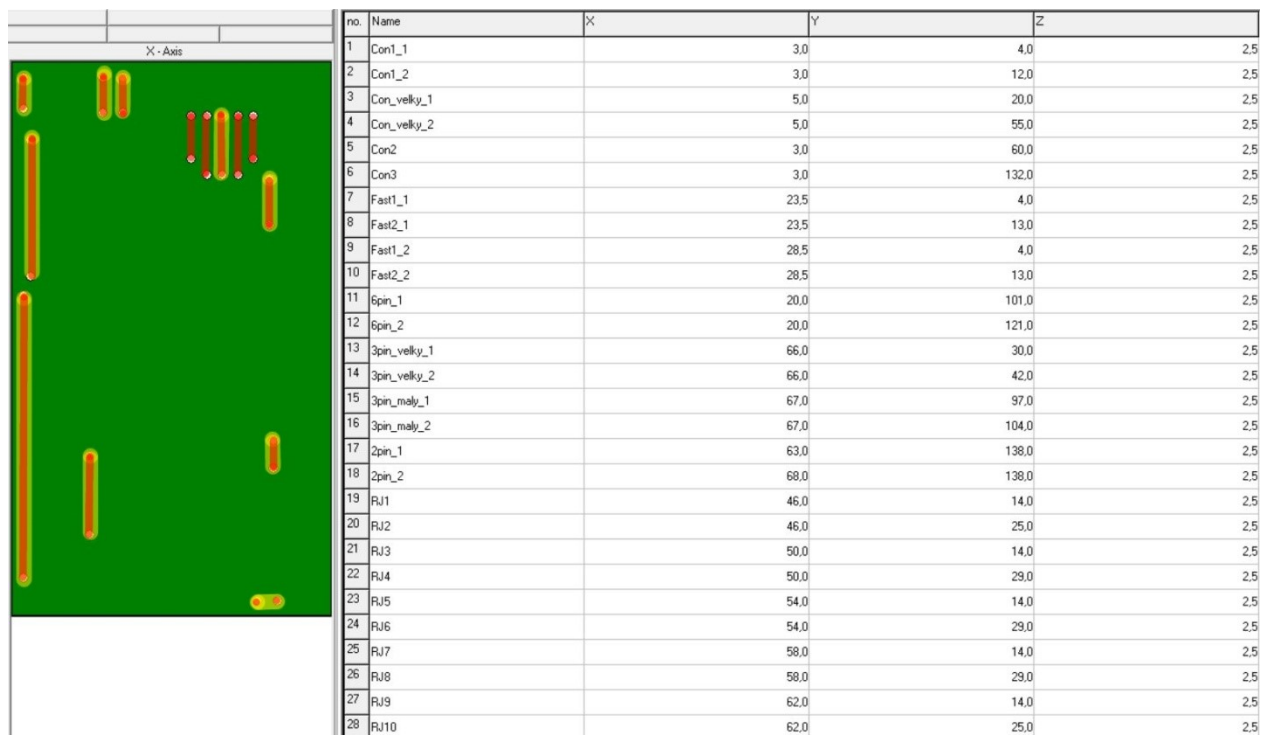
Zařízení	Kontaktní doba [s]			Kontaktní délka [cm]			Paralelnost [s]
	Kraj (A)	Střed (B)	Kraj (C)	Kraj (A)	Střed (B)	Kraj (C)	
Vlna 2	0,70	0,70	1,10	1,25	1,25	1,96	0,30
Vlna 3	0,60	0,70	0,60	1,43	1,67	1,43	0,00

Tabulka 8 Kontaktní doby a kontaktní délky v laminární vlně

Zařízení	Kontaktní doba [s]			Kontaktní délka [cm]			Paralelnost [s]
	Kraj (A)	Střed (B)	Kraj (C)	Kraj (A)	Střed (B)	Kraj (C)	
Vlna 2	3,80	4,10	3,90	6,77	7,30	6,95	0,10
Vlna 3	3,00	3,10	3,30	7,14	7,38	7,86	0,3

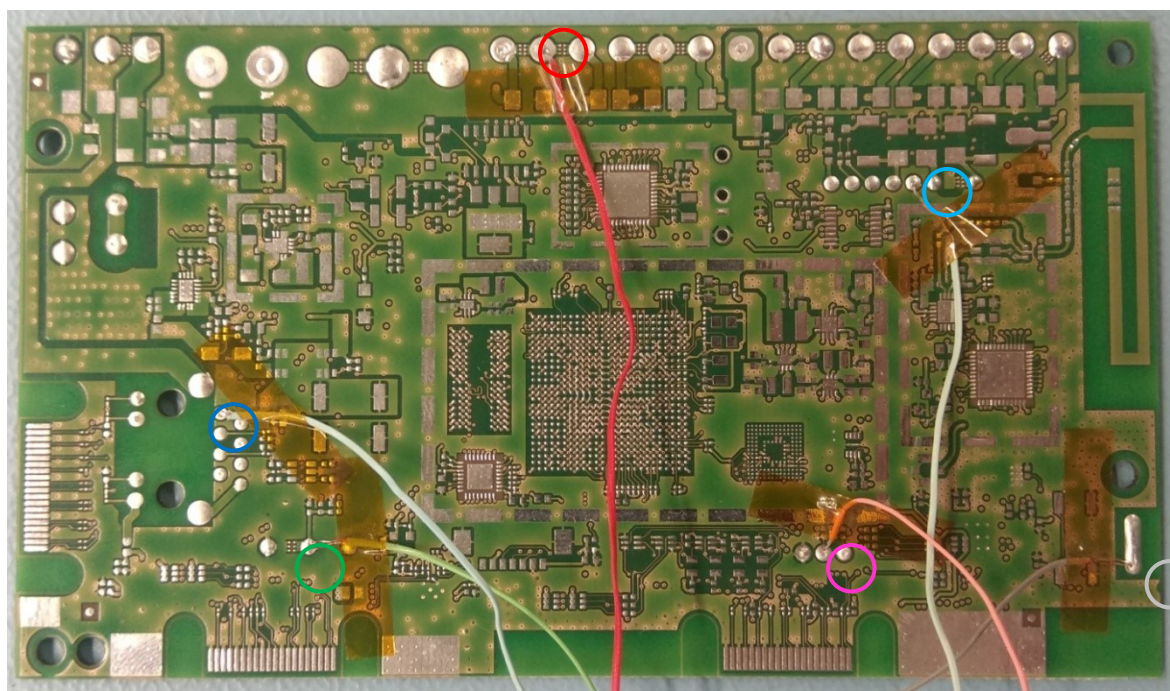
V selektivním zařízení byl taktéž vytvořen pájecí program pro testovanou DPS. Zařízení nanáší tavidlo a pájí dle předem nastavených souřadnic na desce a jim přidělených příkazů. Program použitý pro desku spolu se souřadnicemi vývodů součástek je znázorněn na obrázku 18. Tlak tavidla v tavidlovém tanku byl nastaven na 5 bar, rychlost pojezdu při nanášení tavidla byla 100 cm/min, u konektorů RJ a 3pin_maly byla dodatečně snížena na 75 cm/min. Pájecí tryska byla zvolena s vnitřním průměrem 3 mm, kvůli součástce 3pin_maly, jelikož se

nachází ve velmi malé vzdálenosti SMD komponent a shieldu. Výška vlny byla nastavena na 54 %. Rychlost pojezdu při pájení byla nastavena na 60 cm/min, u součástky Con_velky byla dodatečně snížena na 50 cm/min. Při pájení bodu byla prodleva DPS v pájce nastavena na 2 s. Teplota pájecí slitiny byla nastavena na 330 °C.



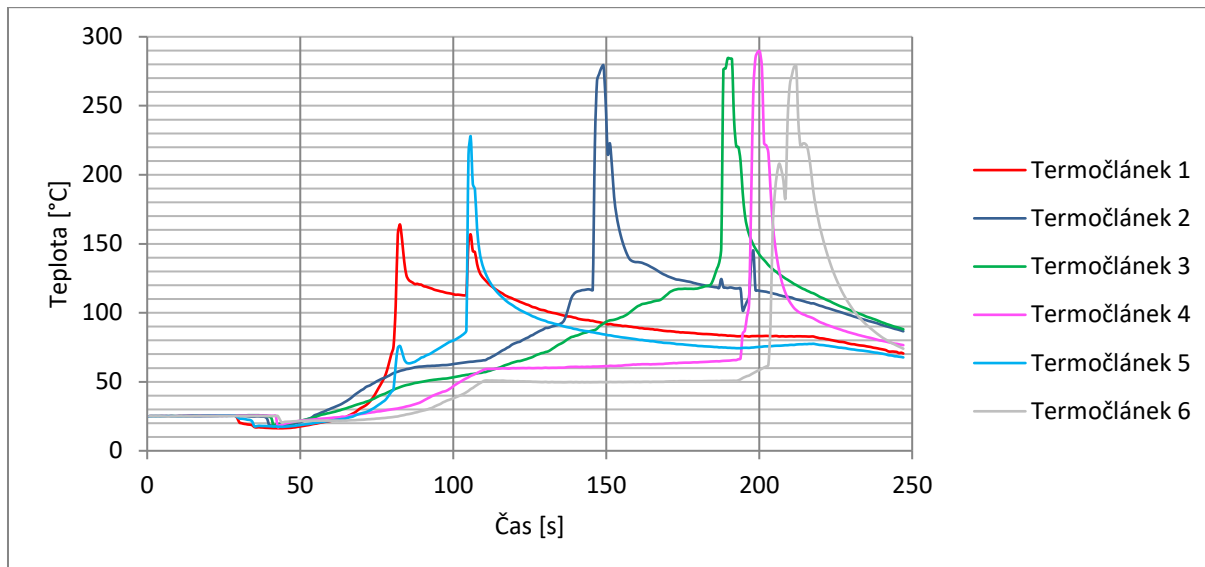
Obr. 22 Schematické znázornění páj. programu (žlutá dráha nanášení tavidla, červená pájení)

Pro ověření procesu selektivního pájení na zařízení EBSO není možné použít WaveRider, proto byla pomocí termočlánků zhotovena profilační DPS. Ta je vyobrazena na obrázku níže.



Obr. 23 Profilační DPS

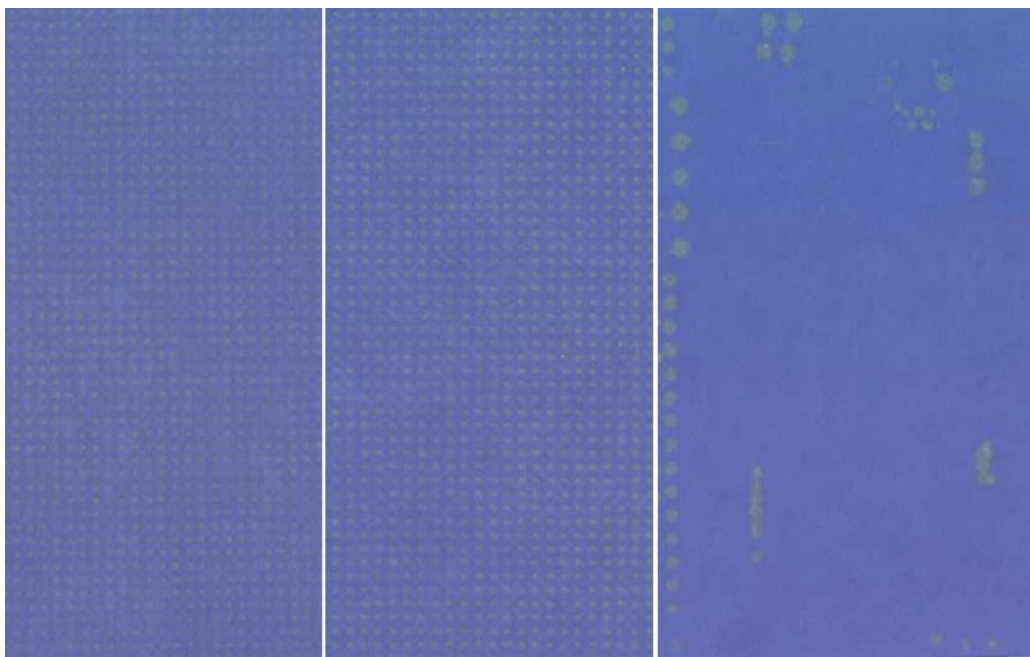
Naměřený profil je znázorněn v grafu 3.



Graf 3 Teplotní profil selektivního zařízení EBSO

U termočláneku č. 1 můžeme pozorovat nízkou teplotu pro přetavení slitiny. Ta může být dána tím, že nevznikl kontakt mezi pájkou a prokoveným otvorem se zapájeným termočlánekem. Pokud by však v otvoru byla osazena součástka, pájka by po vývodu navzlínala do otvoru. V pájecím programu však DPS nelze přiblížit více k trysce, mohlo by dojít k poničení trysky. Při produkčním testu nebyly pozorovány žádné problémy se zapájením konektoru Con2, který se nachází na místě, kde je upevněn termočlánek.

Dále byla otestována homogenita nanesení tavidla daných 3 zařízení. V případě vln byl umístěn testovací pH papír do speciálního rámu a vložen do zařízení. U selektivního zařízení tento rám nelze použít, proto byla do univerzálního rámu upnuta testovací DPS, papír umístěn na ni a zatížen, aby nedošlo k odfouknutí papíru proudem vzduchu, který rozptyluje tavidlo.



Obr. 24 Homogenita naneseného tavidla (zleva vlna 2, vlna 3, EBSO)

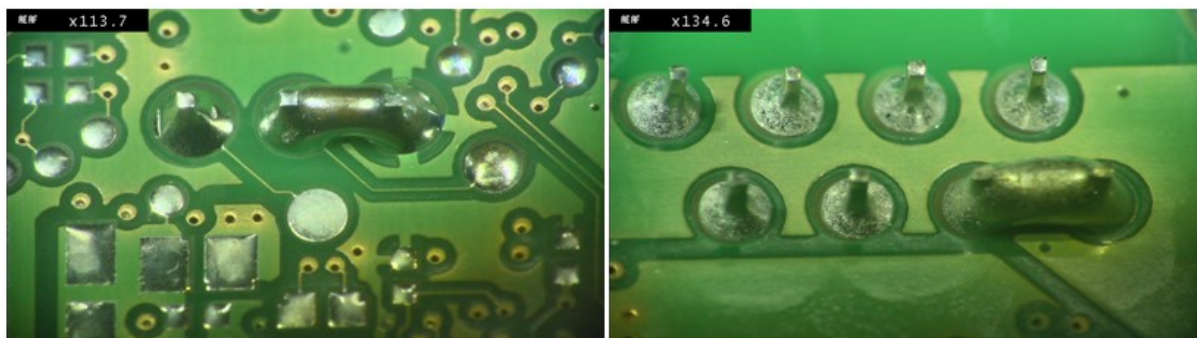
U vlny 3 je obrazec nepatrně jasnější, to zpravidla značí větší množství tavidla. Jasnější barva však může být způsobena i jinou kyselostí použitého tavidla. U zařízení EBSO je obrazec nejjasnější, to je rovněž dáno vyšším množstvím naneseného tavidla.

Při produkčním testu bylo zapájeno na každém zařízení při finálním nastavení 5 DPS osazených pouze vývodovými součástkami, vyšší množství nebylo možné z důvodu omezeného počtu testovacích DPS. Nicméně tohle množství postačilo pro ověření reprodukovatelnosti procesu a vzorky byly podrobeny dalšímu testování a pozorování.

3.4.2 Nejčastější defekty po pájení produktu

3.4.2.1. Zkratky

Při selektivním pájení vlnou byly nejčastěji pozorovány zkratky mezi vývody součástky 3pin_maly. Zkrat byl způsoben nejspíše nedostatkem prostoru v masce pro natečení pájecí slitiny. Masku však nemohla být zkonstruována jiným způsobem z důvodu blízkosti SMD komponent k dané součástce. Dalším důvodem mohlo být nedostatečné množství tavidla. Větší množství by mělo negativní vliv jak na tvorbu kuliček pájky mezi vývody, tak na celkovou čistotu pájené desky. U selektivního zařízení docházelo ke zkratům na síťovém konektoru RJ a na malém 3pinovém konektoru. To bylo způsobeno nedostatkem naneseného tavidla. Po snížení rychlosti při fluxování těchto součástek se defekt přestal objevovat. Obr 25 vyobrazuje zkrat z vlny 2 a po selektivním pájení.



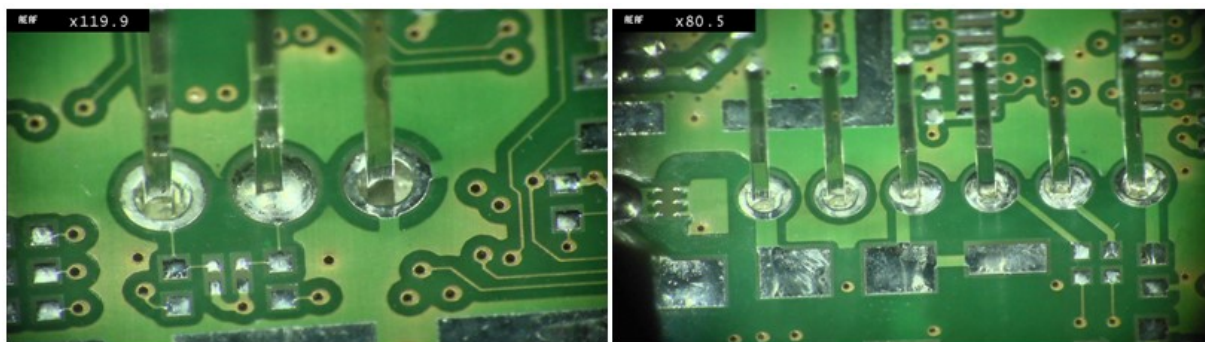
Obr. 25 Zkratky mezi piny komponent

3.4.2.2. Nedostatečné navzlínání

Nedostatečné navzlínání bylo pozorováno opět zejména u vlny 2 a 3. To může být způsobeno hlavně nedostatečným předehřátím DPS před samotným pájením. Z důvodu velké tloušťky pájecí masky (až 10 mm) se v předehřátých zónách deska neprohřeje dostatečně a pájka zatuhne dřív, než stihne navztlínat skrz prokovené otvory. U vlny 3 může být tento problém způsoben absencí horního předehřevu, horní strana DPS tedy nemá vhodnou teplotu pro pájení. U vlny 2 by mohla pomoci inertní atmosféra, která zajistí lepší roztékavost pájky. Další příčinou špatného navzlínání pájky by mohlo být nedostatečné množství tavidla v prokoveném otvoru. Zvýšení množství tavidla pro lepší navzlínání již nebylo možné, příliš mnoho tavidla by mohlo způsobovat jiné problémy – ještě větší ochlazení DPS, pájkové kuličky na nepájecí masce apod.

Při nastavování programu u vln byl dokázán i vliv čipové vlny na vztlínání pájky. Při vypnutí čipové vlně došlo k nedostatečnému navzlínání i na jinak bezproblémových součástkách

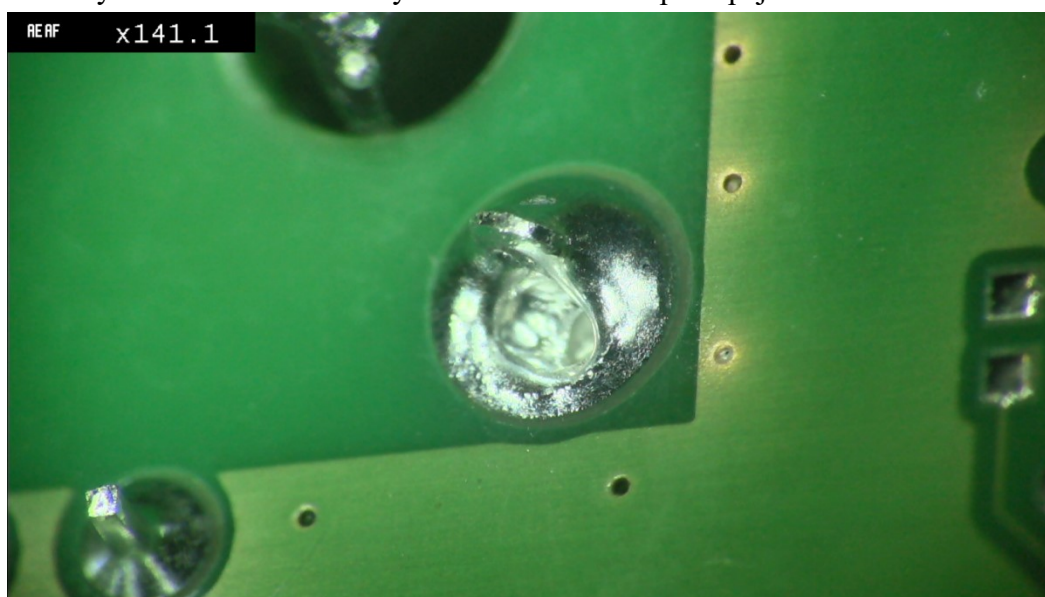
(6pin). Při nižším výkonu čipové i Wortmannovy vlny docházelo k nižším navzlínání pájky do prokovených otvorů mezi konektory Con2 a Con 3. U vlny 2 by mohla pomoci instalace Wortmannovy trysky namísto klasické. Wortmannova tryska díky její konstrukci zajistí delší kontaktní dobu pájky s deskou, než klasická čipová vlna. U vlny 3 byl program odladěn tak, aby navzlínání bylo co nejlepší. Čipovou vlnu u vlny 3 již nebylo možné zvedat, docházelo by k zalití pájecího rámu. Na obrázku 26 jsou ukázány defekty z vlny 2.



Obr. 26 Nedostatečné navzlínání u 3pinu a 6pinu

3.4.2.3 Bubliny v pájeném spoji

Bubliny mohou být způsobeny nedostatečným přehřátím DPS před pájením, zbytky neodpařeného tavidla, případně jiné nečistoty při kontaktu s pájecí slitinou vybublávají na povrch a tvoří voidy, případně díry v pájeném spoji. Vyfouknuté bublinky byly pozorovány pouze u vlny 1 a 2. U vlny 3 jsou vyšší teploty přehřevů, které dovoluje dusíková atmosféra, a u selektivního zařízení bubliny nevznikají zřejmě díky tavidlu na alkoholové bázi. Tavidlo se tedy aktivuje a odpaří ještě před pájením samotným. Předejít bublinám lze zvýšením teploty přehřevu, případně snížením množství tavidla, které v tomto případě možné není, snížila by se výška navzlínání pájky v prokovených otvorech. Na obrázku 27 je vyobrazena vyfouknutá bublina na vývodu RJ konektoru po zapájení ve vlně 2.



Obr. 27 Vyfouknutá bublina u vývodu konektoru

3.4.2.4. Ostatní chyby při produkčním testu

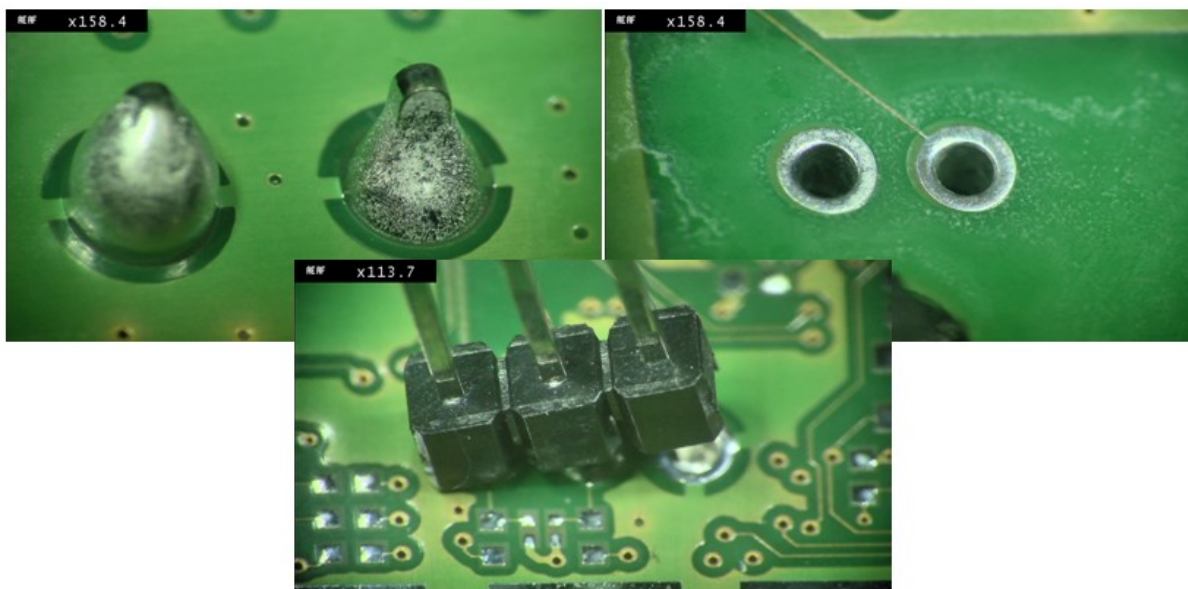
U selektivního zařízení byly zpozorovány nezapájené některé prokovené otvory. Pájka se nedotkne prokoveného otvoru a v otvoru není žádný vývod součástky, pájka tak nemá po čem navzlínat. Chyba je dána nestabilitou tekoucí pájky a vzdáleností DPS od pájecí trysky. Výška pájky je vyšší z důvodu delších vývodů. Při nižších otáčkách a přiblížení DPS k trysce docházelo k odírání vývodů o pájecí trysku. To by mohlo způsobit nadzvedání součástek, případně i vytlačení komponenty, v horším případě i poškození trysky.

U vlny 2 a 3 se vyskytly nadzvednuté/nakloněné součástky 6pin a 3pin. U vlny 2 je na vině nejspíše čipová vlna, která je díky své výšce nestabilní a velmi citlivá na nečistoty v oblasti trysky. V případě znečištění trysky struskou v některém místě se podstatně změní celková výška vlny. Problém by mohla řešit Wortmannova tryska, jež je jinak konstrukčně řešená a pro delší kontaktní dobu pájky s deskou není potřeba takový výkon čerpadla. V případě vlny 3 je defekt způsoben systémem clonek, jež se otírají o desku a mohou tak součástku naklonit nebo vytáhnout úplně. Řešením by mohlo být jednoduché víko, které by součástky před clonkami ochránilo.

U selektivního pájení byl zpozorován na některých vývodech černého konektoru nadbytek pájky, zřejmě způsobený nedostatečným prohrátím spoje (studený spoj), případně velkou rychlostí odtrhu pájecí trysky. Po zpomalení rychlosti pojezdu při pájení problémy s přebytkem pájky vymizely.

Při selektivním pájení byly zpozorovány i miniaturní kuličky pájky v pájecí masce, ty jsou způsobeny nadbytečným množstvím tavidla. U zařízení EBSO tento jev však nelze příliš ovlivnit, proto se desky po zapájení běžně preventivně čistí ESD kartáčem.

Chyby jsou znázorněny na obrázku 28.



Obr. 28 Ostatní defekty po selektivním pájení

Tabulka 9 Četnost viditelných chyb u daných zařízení na finální nastavení pájecího programu

Typ chyby	Ebso	Vlna 2	Vlna 3
Zkrat	1	4	2
Není 100% propájení barelu	1	23	7
Nadzvednutá součástka	0	2	1
Přebytek pájky	5	2	0

Následně byly tyto chyby přepočteny na procentuální chybovost z počtu možností a tyto hodnoty vyneseny do tabulky níže.

Tabulka 10 Procentuální chybovost jednotlivých procesů

Zařízení	Chybovost
EBSO	4,6 %
Vlna 2	20,6 %
Vlna 3	6,6 %

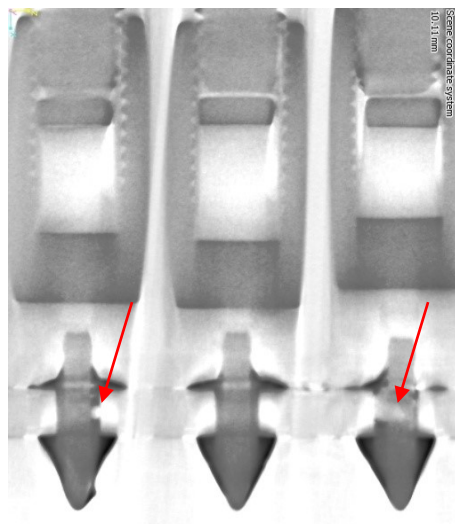
Největší problémy při pájení vlnou byly zpozorovány u zapájení malého 3pinového konektoru. Velký vliv má tloušťka masky v místě konektoru. Okolo konektoru je kvůli osazeným SMD komponentám velmi málo místa pro proniknutí pájky, v důsledku toho není DPS v daném místě dostatečně dlouho v kontaktu s pájkou. V tabulce nejsou zahrnuty chyby u zelených a černého konektoru, jelikož na pájený spoj není z horní strany vidět, tudíž je nelze jednoduše vizuálně posoudit. Tyto konektory byly podrobeny drobnějšímu zkoumání mikrovýbrusem a rentgenové diagnostice (kapitola 3.5.), zda je jejich propájení dostatečné.

3.5. Rentgenová diagnostika a mikrovýbrus

3.5.1. Rentgenová diagnostika

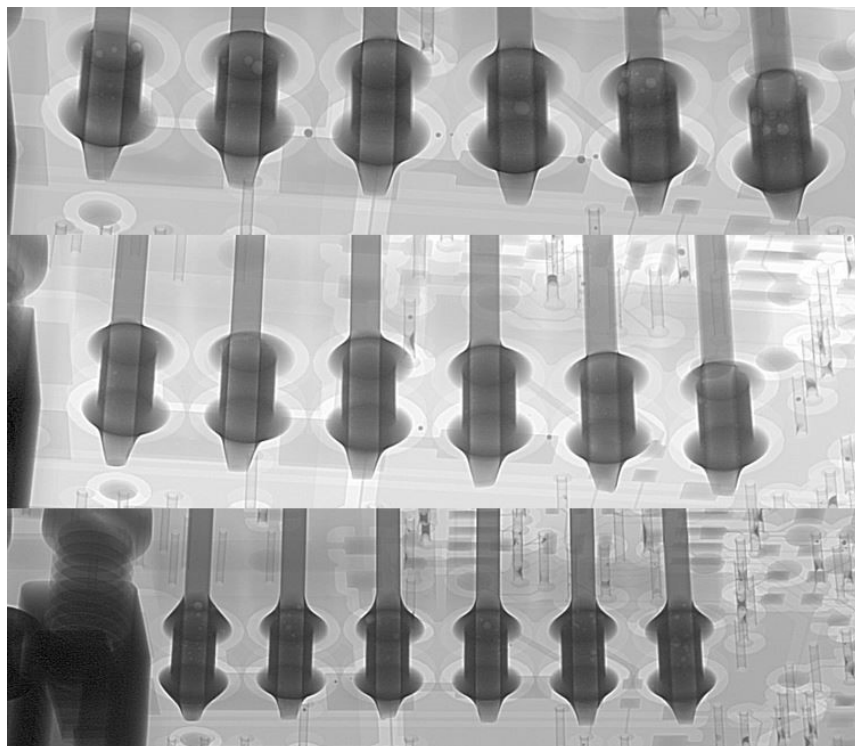
Vzhledem k nepřístupnosti vývodů černého konektoru Con_velky a zelených konektorů byla provedena RTG diagnostika těchto komponent. Diagnostika byla provedena na rentgenovém zařízení YXLON, které umožňuje také CT diagnostiku DPS.

Pro CT diagnostiku byl vybrán zelený konektor CON3.

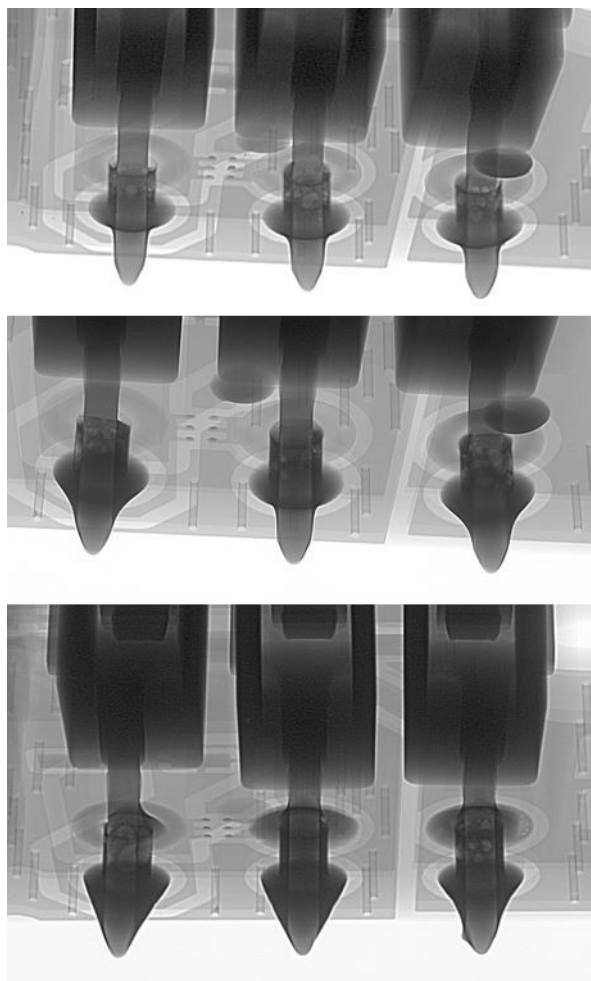


Obr. 29 Voidy na CT snímku konektoru

Při 2D rentgenové diagnostice byly pozorování podrobeny 6pinové konektory a taktéž zelený konektor Con1.



Obr. 30 Porovnání kvality zapájení 6pinového konektoru (shora vlna 2, vlna 3, EBSO)



Obr. 31 Porovnání kvality zapájení zeleného konektoru Con1 (Shora vlna 2, vlna 3, EBSO)

Na rentgenových snímcích lze pozorovat množství voidů u všech třech výrobních procesů. Nejméně voidů se vyskytuje na DPS vyrobených na vlně 3, zřejmě díky správně zreagovanému tavidlu a menšímu množství oxidů v inertní atmosféře. Na obr. 31 lze pozorovat i rozdílné pájkové výplně pokovených otvorů.

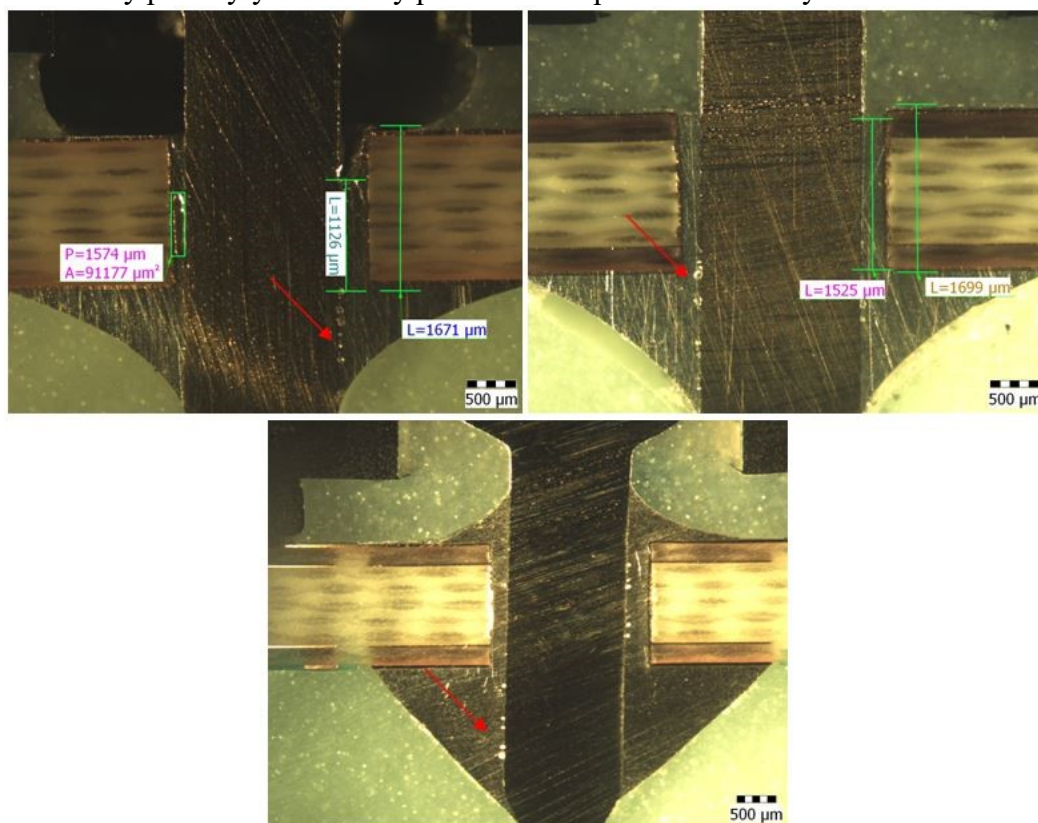
3.5.2. Mikrovýbrus konektorů

Dále byly součástky Con_velky a 3pin_maly (vyhodnoceny jako nejobtížněji pájitelné) podrobeny mikrovýbrusu, aby byla ověřena dostatečná výška navzlínání pájky.

Postup přípravy mikrovýbrusu:

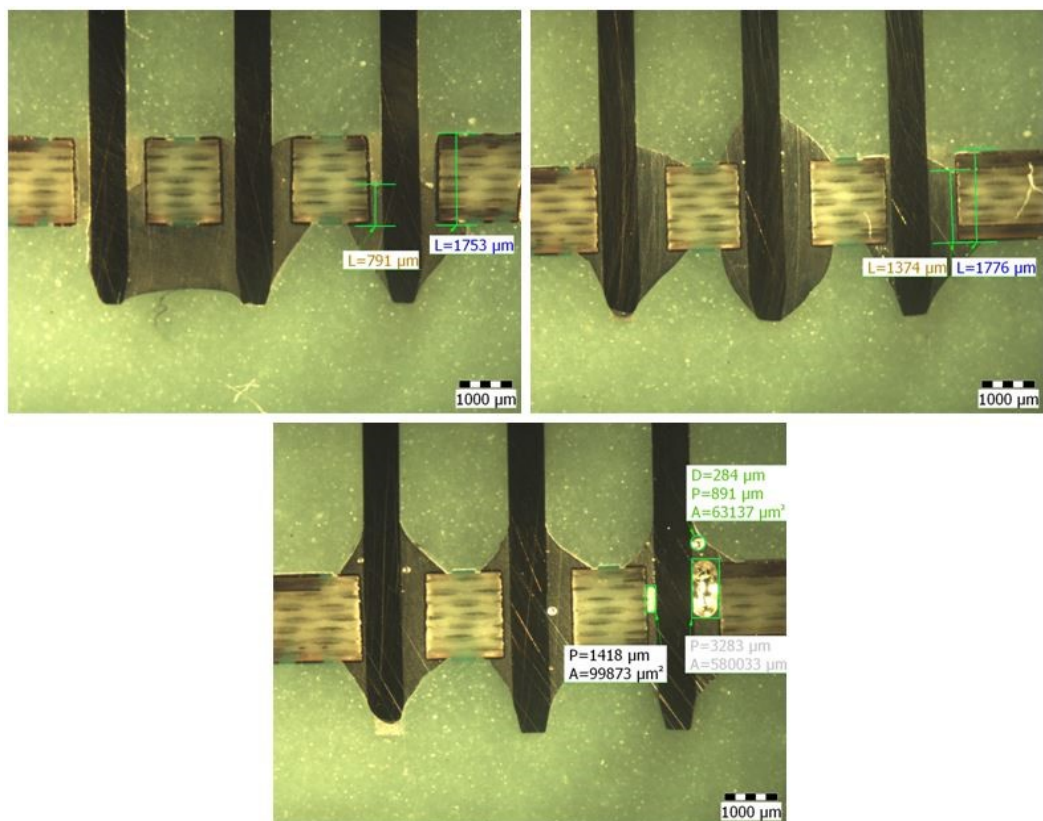
- Vyřezání sledovaných komponent z DPS pomocí diamantového kotouče a pilky
- Následné upevnění výřezu do zalévací formy
- Smíchání složek dentacrylu v požadovaném poměru a homogenizace směsi
- Polymerace směsi při pokojové teplotě po dobu cca 30 minut
- Vyjmutí vzorku z formy a následný oplach
- Broušení vzorku pod proudem tekoucí vody brusným papírem hrubosti 180, 320, dále na jemnozrnném papíru hrubosti 600 a 1200
- Oplach v ultrazvukové myčce po dobu 10 minut
- Leštění vzorku pomocí plátěného kotouče, lešticí emulze s velikostí částic 1 μm a IPA

Broušené vzorky poté byly zkoumány pod mikroskopem a nasnímány.



Obr. 32 Mikrovýbrus černého konektoru (vlevo vlna 2, vpravo vlna 3, dole EBSO)

Na obrázku 32 můžeme pozorovat výšku navzlínání pájky při daných procesech. Nejlepší navzlínání je patrné u selektivního zařízení EBSO, u vlny 2 bylo vypočteno navzlínání 67 %, což znamená, že výška není vyhovující, navíc je vidět v prokoveném otvoru poměrně velká dutina. Ta samotná by mohla mít vliv na pevnost pájeného spoje. U vlny 3 se navzlínání pohybuje okolo 90 %. U všech zařízení byly pozorovány tzv. planární voidy na rozhraní vývod – pájka. Vzhledem k tomu, že se vyskytovaly pouze u vývodů černého konektoru, může to znamenat například špatnou povrchovou úpravu vývodu, případně jeho mírnou oxidaci.

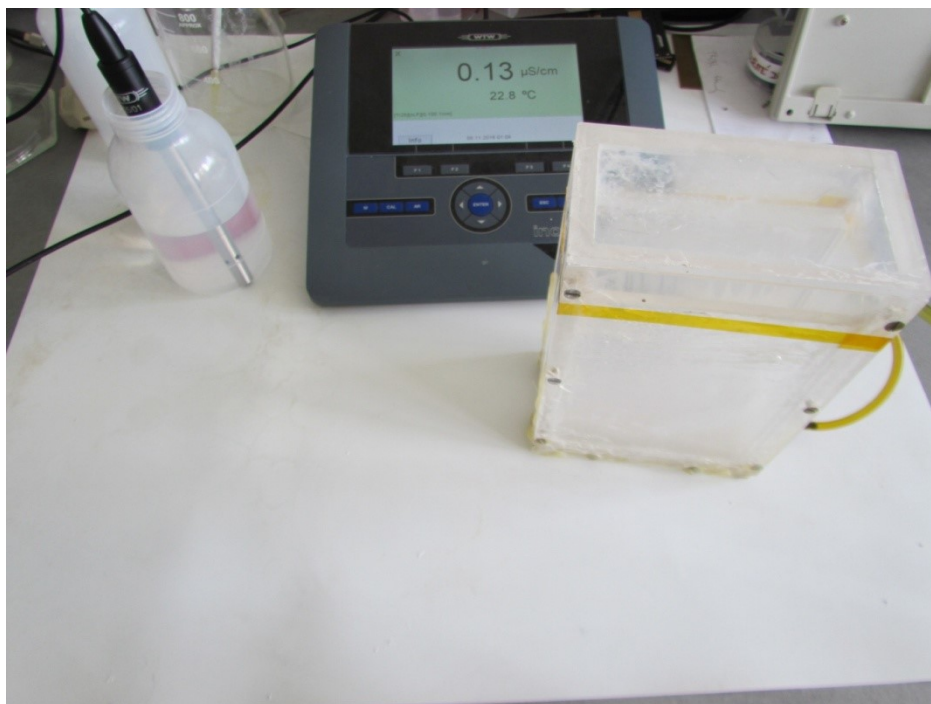


Obr. 33 Mikrovýbrus 3pinového konektoru (vlevo vlna 2, vpravo vlna 3, dole EBSO)

Na obrázku 33 lze pozorovat zkrat u vlny 2 a zároveň nedostatečné navzlínání pájky, či nezapájení jedné strany vývodu 3pinového konektoru. U vlny 3 byla výška navzlínání přibližně 80 %, což je dle normy IPC-A-610 dostačující. U selektivního zařízení EBSO je vidět nejvyšší míra nasmačení, v pájeném spoji však jdou vidět voidy, které by mohly mít vliv na pevnost spoje a působit problémy při připojování a odpojování trojpinového konektoru. Těmito dutinám by se dalo zabránit buď snížením množství aplikovaného tavidla, případně prodloužením kontaktní doby DPS s roztavenou pájkou, aby se tavidlo stihlo odpařit a uniknout ze spoje ven.

3.6. Testování čistoty výroby

Zjišťování ionizovatelných nečistot na DPS bylo provedeno pomocí zjednodušené statické metody ROSE. Čistota byla sledována po zapájení testovacích desek v běžném výrobním procesu. Před procesem pájení byly desky omyty v myčce a poté neosazené zapájeny vlnou/lokální tryskou. Následně byla změřena vodivost nekontaminovaného roztoku, ta by se měla pohybovat ideálně okolo 0,05 $\mu\text{S}/\text{cm}$. Poté byly do měřicí lázně tvořené ze 75 % IPA a 25 % deionizovanou vodou vloženy zapájené testovací desky a ponechány probublávat dusíkem po dobu 15 minut. Po uplynutí doby byla opět změřena vodivost již kontaminovaného roztoku. Nakonec byl změřen objem měřicí kapaliny. Testování probíhalo pro 3 desky pro každý proces a pro jednu čistou desku.



Obr. 34 Měřicí zařízení pro zjišťování kontaminace a nádoba použita pro výluh DPS

Z měření byl vypočten aritmetický průměr a míra kontaminace DPS podle vzorce:

$$Z_{PS} = \frac{(\gamma_1 - \gamma_0) * V}{S * k_g} \quad (3)$$

Tabulka 11 Koncentrace nečistot po různých pájecích procesech

Zařízení	Počáteční vodivost	Konečná vodivost	Objem kapaliny	Plocha desky	Koncentrace nečistot
	γ_0 [$\mu\text{S}/\text{cm}$]	γ_1 [$\mu\text{S}/\text{cm}$]	V [cm^3]	S [cm^2]	Z_{PS} [$\mu\text{gNaCl}/\text{g.cm}^2$]
EBSO	0,08	0,29	760,00	232	1,44
Vlna 2	0,09	0,25	770,00	232	1,15
Vlna 3	0,08	0,24	763,33	232	1,12
Čistá deska	0,09	0,14	760,00	232	0,35

Měřením byly zjištěny přibližné míry kontaminace u pájecích procesů v různých pájecích zařízeních. Kontaminace je vidět u všech procesů velmi malá. To může být tím, že desky u vlny 2 a vlny 3 jsou maskovány a tavidlo je naneseno pouze na odmaskovaná místa. Nejvyšší kontaminace byla pozorována u zařízení EBSO, i přesto, že tavidlo použité v tomto zařízení má nejnižší množství sušiny. Vyšší míra znečištění může být dána samotným procesem, DPS byla v selektivním zařízení pájena v univerzálním rámu, proto mohla fluxovací tryska ostříknout i místa okolo pájecích otvorů a tavidlo nemuselo zreagovat při pájení. Nicméně deska je v měřicím roztoku omyta celá, proto je tohle měření pouze orientační, případné vysoké koncentrace nečistot na určitých místech DPS touto metodou zjistit nelze.

Pro zpřesnění bylo množství soli přepočteno pouze na plochu, na kterou bylo naneseno tavidlo. Míra kontaminace byla přepočtena podle vzorce:

$$Z = \frac{(Z_k - Z_{\check{c}}) \cdot S_{DPS}}{S_t} \quad (4)$$

kde:

Z_k – celková kontaminace DPS ($\mu\text{gNaCl} \cdot \text{cm}^{-2}$)

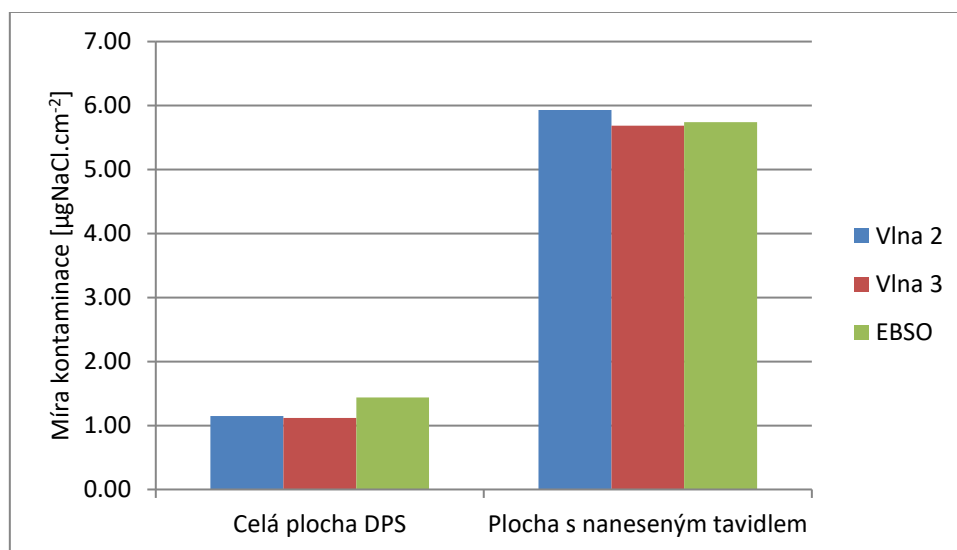
$Z_{\check{c}}$ - kontaminace čisté DPS ($\mu\text{gNaCl} \cdot \text{cm}^{-2}$)

S_{DPS} – Celková plocha DPS (cm^2)

S_t – Plocha, kde bylo naneseno tavidlo (cm^2)

Tabulka 12 Koncentrace nečistot přepočtená na plochu s naneseným tavidlem

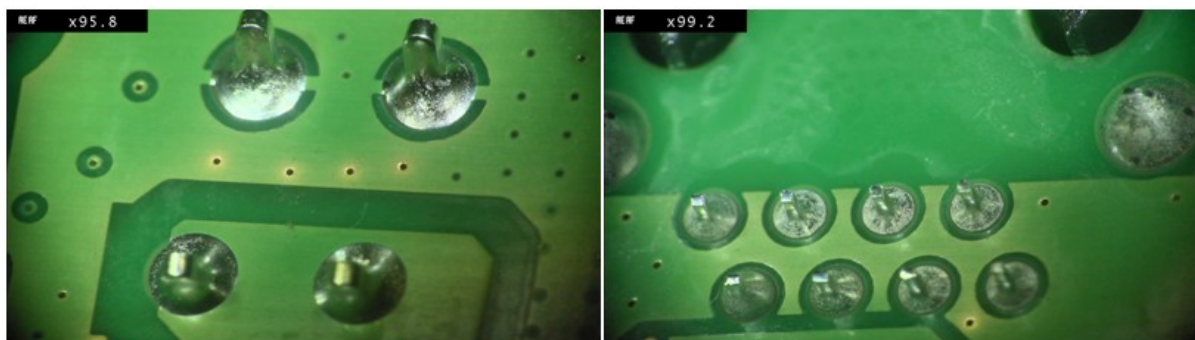
Zařízení	Plocha s naneseným tavidlem	Koncentrace nečistot
	$S_t [\text{cm}^2]$	$Z [\mu\text{gNaCl} \cdot \text{cm}^{-2}]$
EBSO	44,00	5,74
Vlna 2	31,39	5,91
Vlna 3	31,39	5,69



Graf 4 Porovnání kontaminace celé DPS a přepočtené koncentrace na plochu s naneseným tavidlem

Po přepočtení lze pozorovat, že poměrová kontaminace u zařízení EBSO vyšla nižší, než u vlny 2. To je dáno právě plochou, na které bylo nanesené tavidlo. Plocha je větší, než u vln, právě díky masce užitá při pájení vlnou.

Po vizuální stránce vyšly DPS zapájené na selektivním zařízení nejhůře, okolo zapájených míst byly patrné solné mapy, patrně kvůli vyššímu množství naneseného tavidla. Vizuální zhodnocení nejhorších míst na DPS je na obr. 35. U vlny 3 nebyly zpozorovány téměř žádné tavidlové zbytky. To může být dáno dusíkovou atmosférou, která nám umožní vyšší teploty přehřevů nebo charakterem tavidla samotného. Podle výsledných výpočtů kontaminace však můžeme soudit, že dané zbytky pouze nejsou vidět.



Obr. 35 Tavidlové zbytky na DPS (Vlna 2 vlevo, zařízení EBSO vpravo)

Mírná koncentrace nečistot na čisté DPS mohla vzniknout při manipulaci s DPS, případně při samotném umývání desky, mycí médium v myčce má totiž vyšší vodivost, než měřicí roztok.

3.7. Testování smáčivosti vývodu

Testování bylo provedeno v meniskografu na vývodech bílého konektoru 3PIN_VELKY. Vývody mají průměr 1 mm, rychlost ponoru do pájky byla nastavena na 10 mm/s a hloubka ponoru 3 mm. Pro zkoušky smáčivosti byla užitá pájecí slitina SN100C, jež se používá k pájení na všech zmíněných zařízeních.

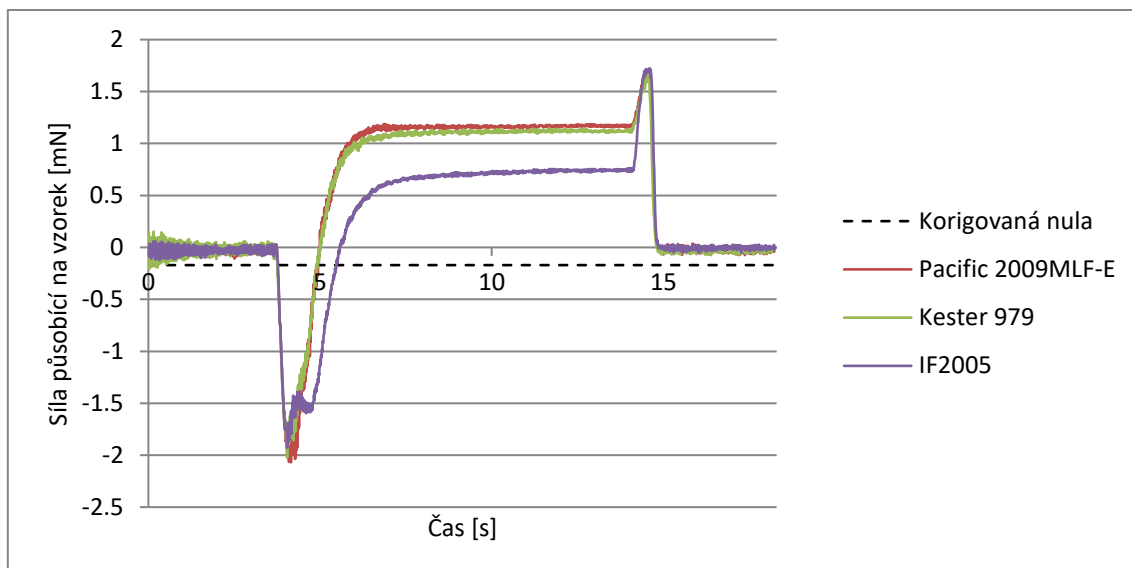
Tabulka 13 Tavidla využitá pro test smáčivosti vývodu

	Kester 979	Pacific 2009MLF-E	IM2005
Rozpouštědlo	DI voda	DI voda	IPA
Klasifikace dle J-STD-004	ORL0	ORL0	ORL0
Hustota	1,02	1,00	0,80
Množství pevných látek	4,5 %	3,6 %	1,85 %
Číslo kyselosti	40 KOH/g	25 KOH/g	14-16 KOH/g
Čištění	NoClean	NoClean	NoClean

Pro každé tavidlo bylo provedeno 10 měření při teplotě slitiny 250 °C. Z hodnot byl vypočten aritmetický průměr, následně vyneseny do grafu. Do grafu byla přidána i korigovaná nula, což je hodnota vztahové síly působící na ponořený vývod vypočtená podle vztahu:

$$F_{vz} = V * \rho_{pájky} * g \quad (5)$$

$$\rho_{SN100C} = 7,4 \text{ g.cm}^3$$



Graf 5 Smáčivost vývodu v pájce SN100C pro různá tavidla

Z průběhů byla odečtena maximální síla F_{\max} působící na vzorek. Po zkorigování o vztlakovou sílu byla určena síla $F_{\max 2}$ a určen čas, kdy byla tato síla přibližně dvoutřetinová. Tento čas je brán od doby, kdy došlo ke styku vývodu a pájecí slitiny. Z poměru $F_{\max 2}/t_{2/3F_{\max 2}}$ lze určit smáčivost vzorku.

Tabulka 14 Vypočtené hodnoty sil a poměrů

Vzorek	Pacific 2009MLF-E	Kester 979	IF2005
F_{vz} [mN]	0,17	0,17	0,17
F_{\max} [mN]	1,19	1,14	0,74
$F_{\max 2}$ [mN]	1,36	1,31	0,91
$F_{\max 2}/t_{2/3F_{\max 2}}$ [mN.s ⁻¹]	0,77	0,74	0,35

Z grafu a tabulky smáčivostí je patrné, že nejvyšší smáčecí sílu i poměr vykazovalo tavidlo Pacific 2009MLF-E. Toto tavidlo je navíc použito v pájecím procesu s inertní dusíkovou atmosférou, proto by se daly předpokládat ještě lepší výsledky smáčivosti.

Naproti tomu smáčecí síla i poměr vyšly výrazně nižší u tavidla IF2005. To je dáno rozpouštědlem tavidla a množstvím pevných látek v něm obsažených. U žádného tavidla nebylo pozorováno odsmáčení.

Roztřesené průběhy jsou způsobeny citlivostí měřicího zařízení a pohybem nádoby s roztavenou slitinou.

3.8. Ověření stability výrobního procesu na vlně 1

3.8.1. Měření naneseného množství tavidla ve vlně 1

Pro testování množství naneseného tavidla byla zvolena „mokrý metoda“ – kartonové desky, které byly před testováním vysušeny při teplotě 60 °C po dobu 30 minut, byly zváženy a upevněny do pájecího rámu. Na takto upevněné rámy bylo poté nanášeno tavidlo sprejovým

fluxerem v různých množstvích. Množství tavidla se nastavuje pomocí zvyšování a snižování tlaku v tavidlovém tanku. Následně byly desky vyjmuty z rámu a opět zváženy.

Z rozdílu hmotností poté bylo vypočteno množství sušiny na cm^2 plochy desky podle rovnice:

$$m_{\text{solidy}} = \frac{(m_1 - m_0) \cdot \% \text{solidů}}{S} \quad (6)$$

Kde:

m_{solidy} – vypočtené množství solidů na cm^2 desky ($\text{g} \cdot \text{cm}^{-2}$)

m_0 – hmotnost zasušené desky (g)

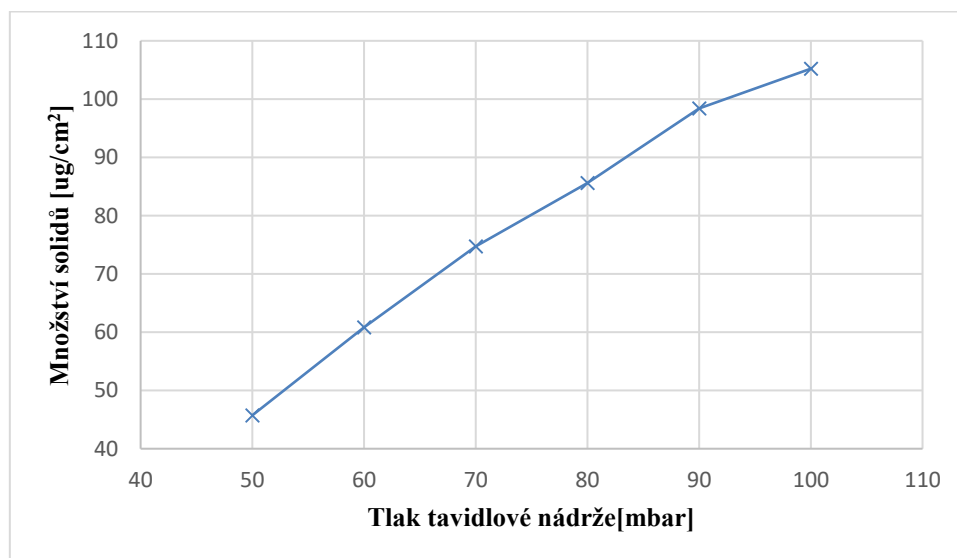
m_1 – hmotnost desky s naneseným tavidlem (g)

S – celková plocha jedné strany desky (cm^2)

Naměřené a následně vypočtené hodnoty jsou vyobrazeny v tabulce č. 15 a grafu č.6.

Tabulka 15 Naměřené a vypočtené hodnoty měření solidů

P_{tanku}	S_{desky}	m_0	m_1	$m_{\text{solidů}}$
mbar	cm^2	g	g	$\mu\text{g} \cdot \text{cm}^{-2}$
50,00	1102,00	33,87	34,99	45,74
60,00	1102,00	33,97	35,46	60,84
70,00	1102,00	34,44	36,27	74,73
80,00	1102,00	38,94	41,03	85,62
90,00	1102,00	34,05	36,46	98,41
100,00	1102,00	32,24	34,81	105,22



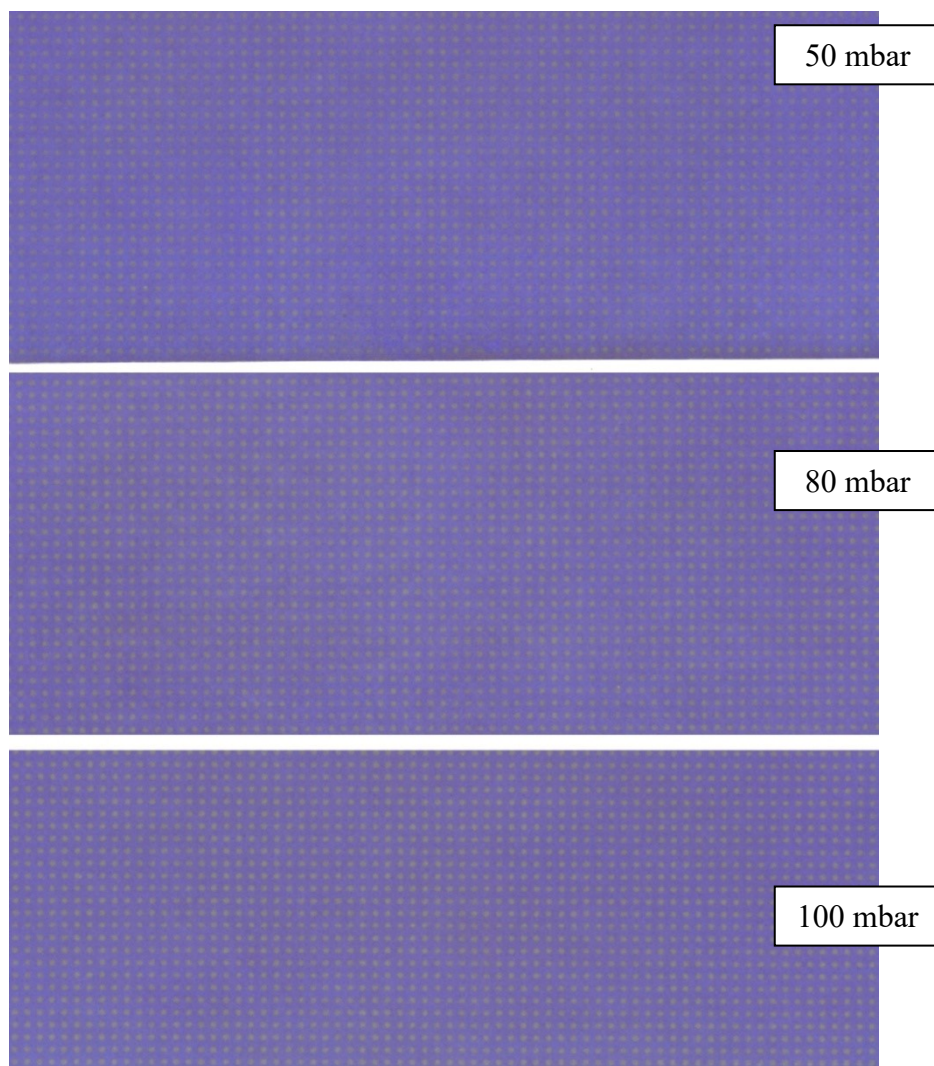
Graf 6 Závislost množství solidů na tlaku v tavidlovém systému

Jak z tabulky, tak z grafického znázornění je patrné, že množství solidů na DPS s tlakem v tavidlovém systému téměř lineárně roste. Doporučené množství nanesení dle výrobce je $100 - 240 \mu\text{g}$ solidů na cm^2 DPS. Dle měření je zřejmé, že lze nanést i větší množství tavidla na desku. Naměřené hodnoty však nemusejí odpovídat skutečnosti a mohou být ovlivněny

navázáním vzdušné vlhkosti do kartonů, proto je měření pouze orientační i přesto, že se podařilo ověřit reprodukovatelnost. Měření pouze solidů po zasušení tavidla nebylo proveditelné z důvodu nepatrných rozdílů hmotnosti.

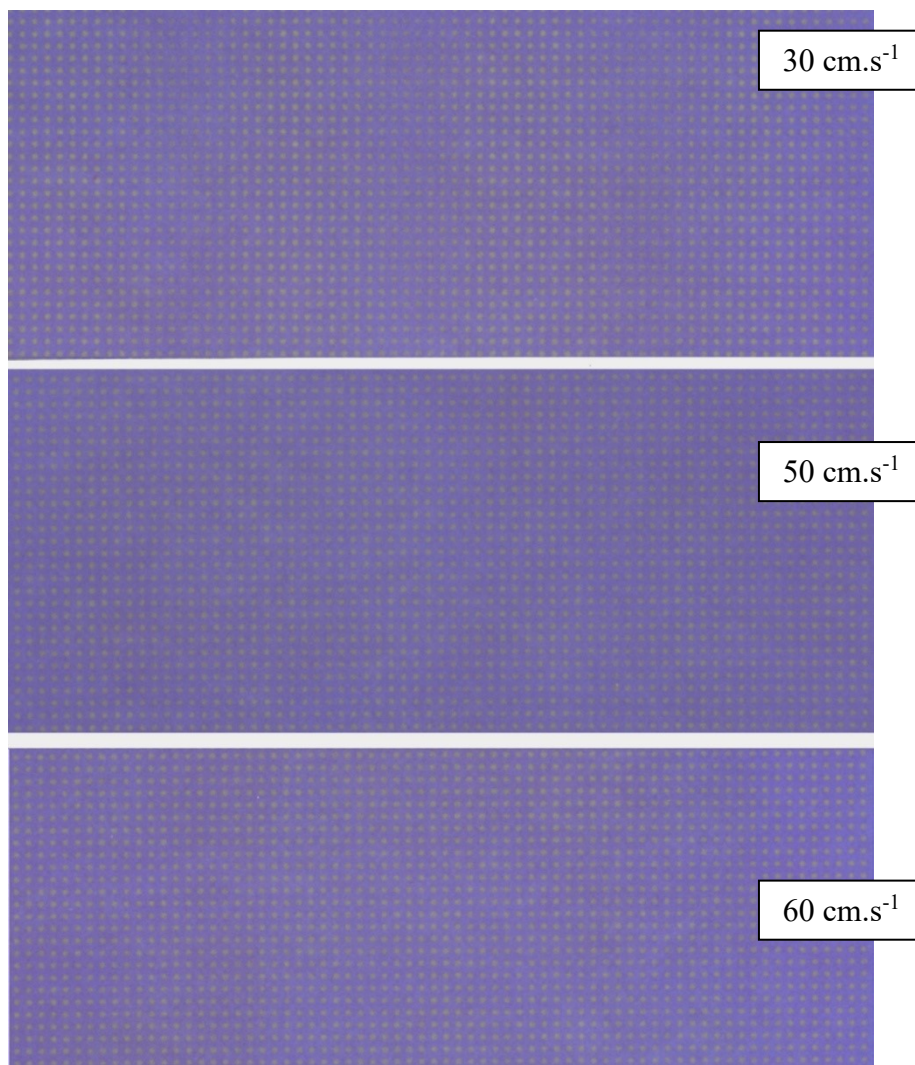
3.8.2. Testování homogenity nanesení tavidla vlny 1

Homogenita nanesení byla testována pomocí pH papírů upevněných do speciálního pájecího rámu. Pod papírem byla umístěna univerzální deska plošných spojů. Testování probíhalo při nanášení tavidla v obou směrech jízdy nanášecí trysky. Pro testování byly nastaveny různé rychlosti pojezdu fluxovací hlavy při tlaku 80 mbar a různé tlaky v nádrži s tavidlem při rychlosti 50 cm.s⁻¹.



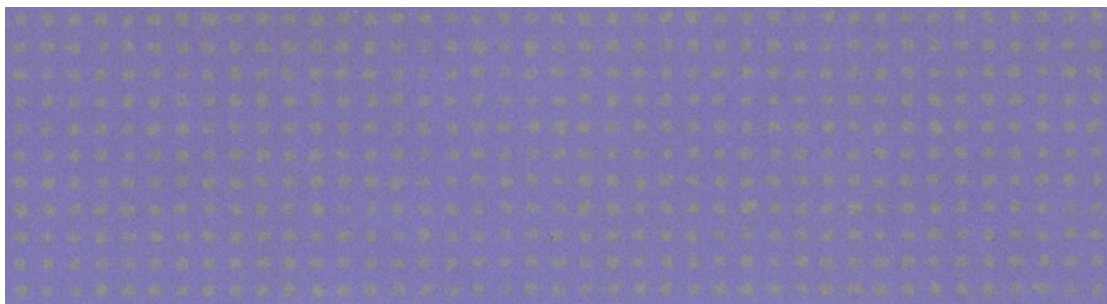
Obr. 36 Flux nanesený s různými nastaveními tlaku v tavidlovém systému

Na obrázku 36 jsou obrazce naneseného tavidla na pH papíru pro 3 hodnoty tlaku. Lze pozorovat, že s vyšším tlakem je obrazec kontrastnější, to značí větší množství naneseného tavidla. Homogenitu nanesení to však příliš neovlivní.



Obr. 37 Tavidlo nanesené s různou rychlostí fluxovací hlavy

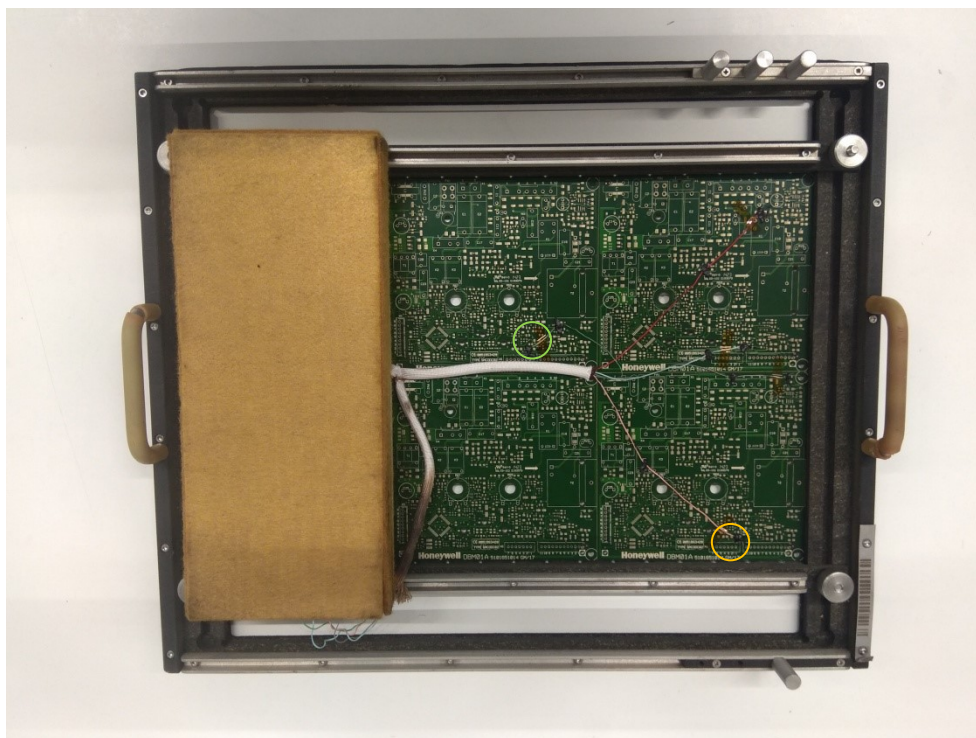
Z obrázku 37 je patrné, že rychlost fluxovací hlavy má výrazný vliv na homogenitu nanesení tavidla na DPS. Při nižších rychlostech hlava nestíhá nasprejovat celou šířku desky – patrné pruhy v první části obrázku. Naopak při vyšších rychlostech hlava může některá místa na desce nasprejovat dvakrát, což by mělo také negativní dopad – tavidlo by se například kvůli zvýšenému množství nestihlo aktivovat a odpařit při předeřívání desky. Proto je nutné co nejprecizněji optimalizovat poměr rychlosti nanášecí trysky a prstového dopravníku celé vlny. Na kvalitu nanesení tavidla má vliv také tlak vzduchu, jenž tavidlo rozptyluje. Při snížení tlaku ve vzduchovém systému již obrazec netvořily ostré tečky, ale pouze skvrny, což znamená, že tavidlo v některých místech neprošlo některými otvory dostatečně (obrázek 38).



Obr. 38 Obrazec při sníženém tlaku rozptylovacího vzduchu

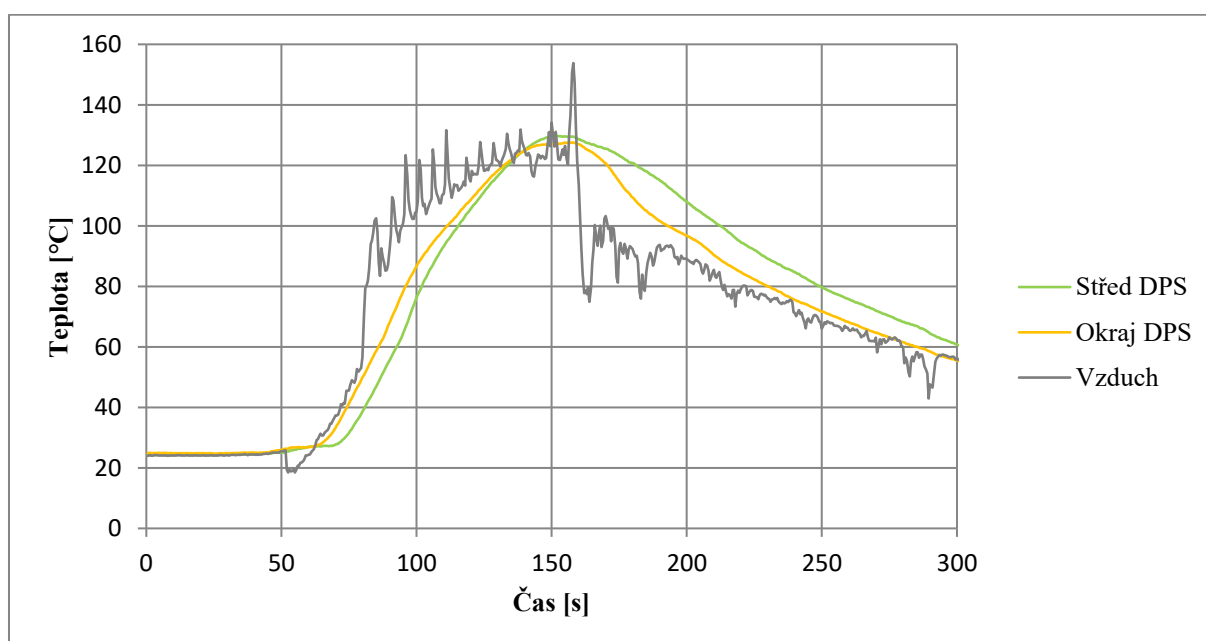
3.8.3 Měření zón přehřevu vlny 1

Pro měření přehřevů byla použita profilační deska s termočlánky upevněná v univerzálním pájecím rámu spolu s měřícím zařízením (obrázek 39). Na profilační DPS bylo naneseno tavidlo a následně prošla všemi přehřívacími zónami. Pájecí vlna byla vypnutá, aby nedošlo ke znehodnocení profilační desky pájkou. Horkovzdušné přehřevy byly ponechány na jeden režim nastavení, infračerveným přehřevům byl měněn výkon z nulového po maximální.

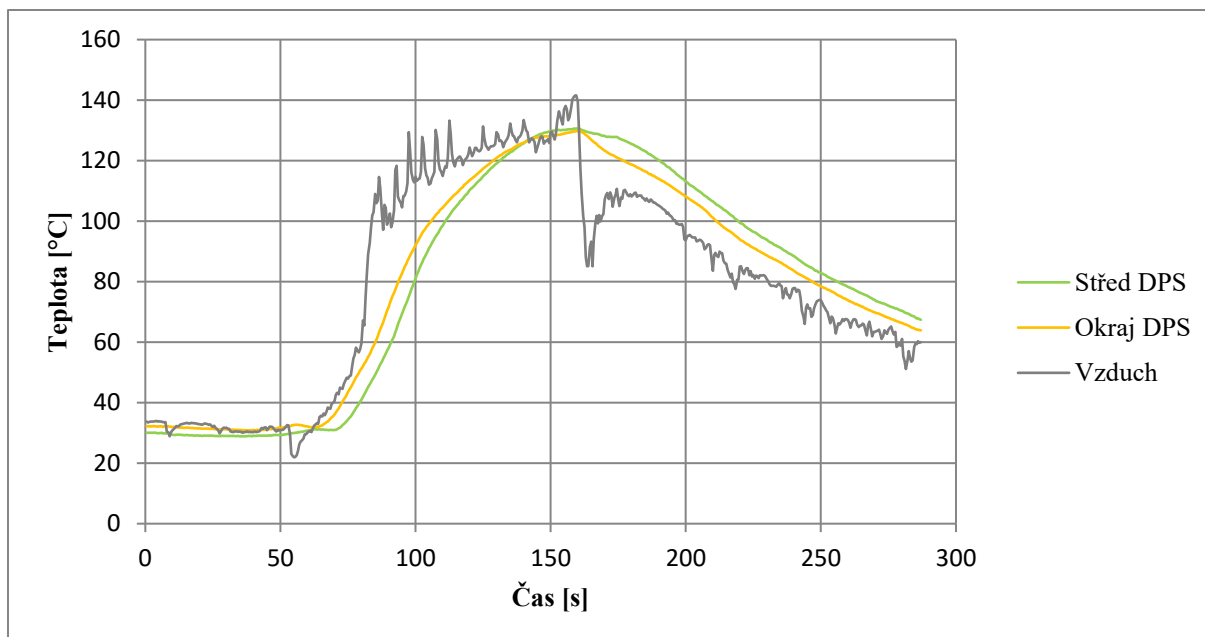


Obr. 39 Pájecí rám s profilační deskou a měřícím zařízením

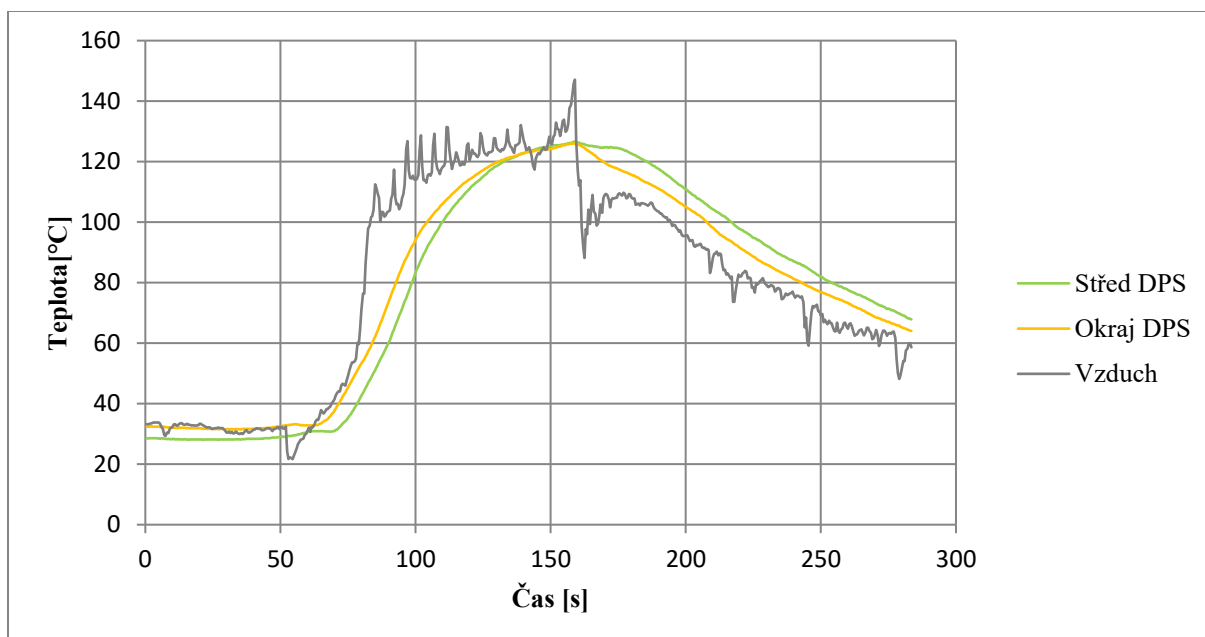
Naměřené hodnoty byly zprůměrovány a vyneseny do grafů pro porovnání.



Graf 7 Průběh teplot s IR přehřevem na plný výkon



Graf 8 Průběh teplot s IR předehřevem na poloviční výkon



Graf 9 Průběh teplot s vypnutými IR předehřevy

Z grafů jde vyčíst, že nanesením tavidla se DPS nepatrně ochladí. Pro měření byl použit termočlánek uprostřed DPS a u okraje desky, pro ověření, nakolik předehřívání ovlivní pájecí rám, který má jinou tepelnou kapacitu, než DPS. Termočlánek ve vzduchu byl použit, aby byla zřetelná funkce ventilátorů. Vzhledem k velkému proudění vzduchu tedy není průběh rovnoměrný a jsou patrné „špičky“. V poslední fázi předehřívání desky lze pozorovat mírný vliv infračervených zářičů (mezi plným výkonem a vypnutými zářiči je rozdíl necelých 5 °C). Zářiče jsou však podpořeny horkovzdušnými ventilátory ze spodní strany. Časový posun zahřívání je daný také různým umístěním termočláneků na DPS.

3.8.4 Měření závislosti kontaktní doby na výkonu čerpadla vlny 1

Měření kontaktních dob a paralelnosti vlny probíhalo měřicím zařízením WaveRider. Kontaktní doba a paralelnost (určitá nerovnost vlny a tím pádem různá kontaktní doba na DPS při pájení vlnou) se měřily pro dvě hladiny pájecí slitiny ve vaně – první měření probíhalo po vybrání pájky na minimální hodnotu, pro druhé měření bylo do pájecí lázně přidáno 5 kg slitiny – pro simulaci přidání pájky po údržbě vlny apod.

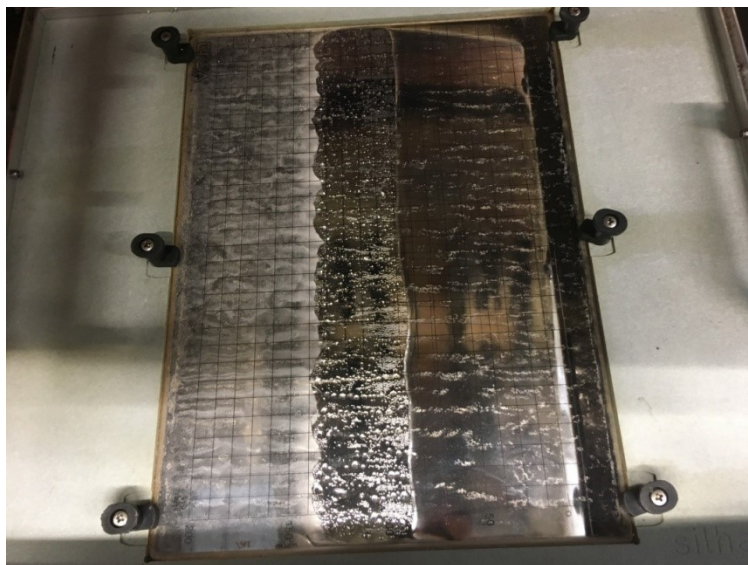
Z naměřené kontaktní doby byla pomocí rychlosti dopravníku vypočítána kontaktní délka.

Pro minimální hladinu pájky bylo provedeno měření pro 5 různých rychlostí čerpadla, pro ověření nárůstu hodnot kontaktních dob. Naměřené a vypočtené hodnoty byly vyneseny do tabulky 16 a graficky znázorněny.

Tabulka 16 Kontaktní doby, kontaktní délky a paralelnost vlny 1

Množství pájky	Rychlost otáček	Kontaktní doba			Kontaktní délka			Paralelnost
		Kraj (A)	Střed (B)	Kraj (C)	Kraj (A)	Střed (B)	Kraj (C)	
-	[ot./min]	[s]			[cm]			[s]
minimum	280,00	2,43	2,10	2,40	4,46	3,85	4,40	0,03
	290,00	2,77	2,53	2,70	5,07	4,64	4,95	0,13
	300,00	3,17	2,87	3,13	5,81	5,26	5,74	0,10
	310,00	3,37	3,17	3,03	6,17	5,81	5,56	0,33
	320,00	3,63	3,27	3,33	6,66	5,99	6,11	0,37
min+5kg	280,00	2,53	2,40	2,40	4,64	4,40	4,40	0,13
	290,00	2,90	2,60	2,60	5,32	4,77	4,77	0,30
	300,00	3,10	2,77	2,93	5,68	5,07	5,38	0,17

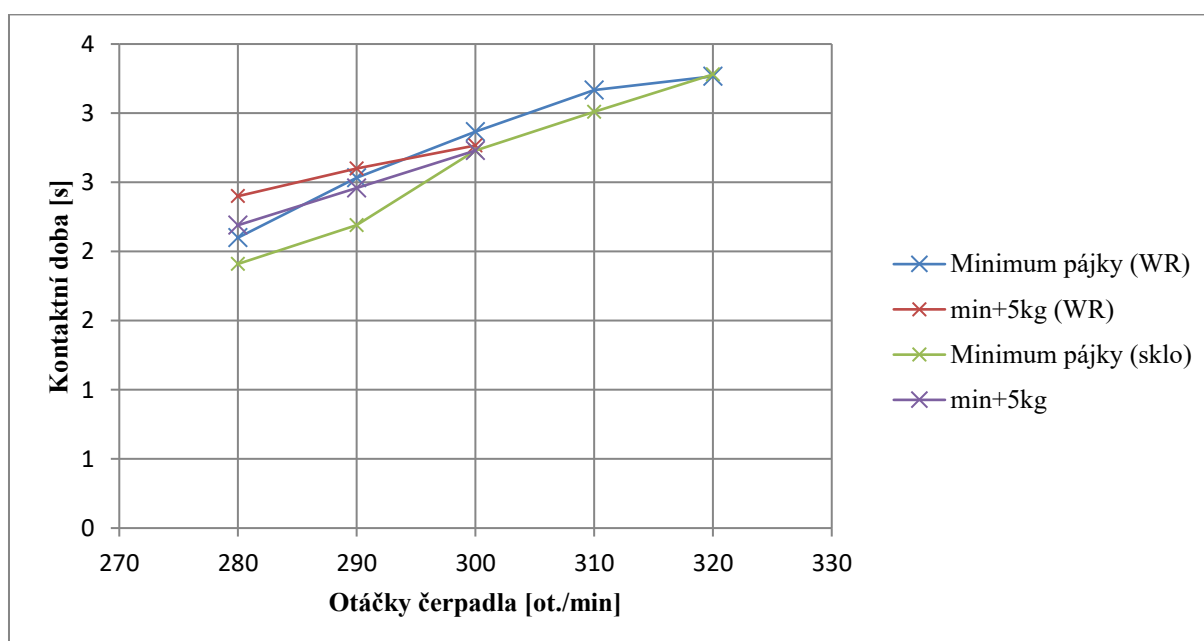
Souběžně s WaveRiderem byla kontaktní délka a doba ověřována pomocí pájecího skla. Tohle měření je však kvůli špatné čitelnosti ze skla pouze informativní a odhalí jen hrubé odchylky procesu. Spočívá v odečítání dílků (každý dílek má rozměr 1x1cm) na skle, které smáčí pájka, a následném přepočtení pomocí rychlosti dopravníku na kontaktní dobu. Hodnoty odečtených kontaktních délek a přepočtených kontaktních dob jsou vyneseny do tabulky 17.



Obr. 40 Ukázka měření kontaktní délky pomocí skla (rychlost čerpadla 300 ot./min)

Tabulka 17 Odečtené a vypočtené hodnoty ověřování pájecím sklem

Množství pájky	Rychlost otáček	Kontaktní délka	Kontaktní doba
-	[ot./min]	[cm]	[s]
minimum	280,00	3,50	1,91
	290,00	4,00	2,19
	300,00	5,00	2,73
	310,00	5,50	3,01
	320,00	6,00	3,28
min+5kg	280,00	4,00	2,19
	290,00	4,50	2,46
	300,00	5,00	2,73



Graf 10 Závislost kontaktních dob na otáčkách motoru čerpadla

Z tabulek i grafů je zřejmé, že kontaktní doba DPS s pájkou roste téměř lineárním průběhem. Při vyšších otáčkách už však lineární průběh očekáván není, navíc by mohlo dojít k zalití DPS pájkou a tím k jejímu znehodnocení. Hodnoty naměřené na ověřovacím skle jsou nižší, než hodnoty naměřené WaveRiderem, to souvisí s tím, že WaveRider dobu měří pomocí kovových kontaktů. Kov má jinou smáčivost, než sklo, proto se hodnoty liší. U skla se podařilo ověřit, že množství pájecí slitiny ve vaně má vliv na kontaktní dobu desky plošných spojů se slitinou. Při měření WaveRiderem je kontaktní doba při 300 ot./min kratší s přidáním 5 kg pájecí slitiny do pájecí vlny. To však může být i příčina chyby měřicího přístroje, výrobce udává možnou odchylku až 0,8 s. Proto nic nelze říct ani o měření paralelnosti, jelikož změřené hodnoty jsou příliš nízké, tudíž nevíme, zda jde o skutečnou hodnotu nebo o odchylku. Nicméně malá nerovinnost vlny se připouští, perfektně rovné vlny dosáhnout nelze.

3.9. Ekonomické zhodnocení výroby produktu

U strojů byly změřeny a dopočítány jednotlivé časy výroby DPS. Časy jsou vyneseny do tabulky 18. V tabulce 19 je zapsán výhled požadovaného času výroby (tact time).

Tabulka 18 Změřené a přepočtené časy výroby produktu

Zařízení	Čas na rám	Počet DPS v rámu	Čas na DPS
EBSO	200 s	2	100 s
Vlna 2	42 s	6	7 s
Vlna 3	28 s	6	4,6 s

Tabulka 19 Maximální požadovaný čas výroby pro daná období

Období	Tact time
Rok 1	200 s
Rok 2	170 s
Rok 3	64 s
Rok 4	50 s
Rok 5	46 s

Z tabulek je patrné, že zařízení EBSO se hodí pouze pro malosériovou výrobu a výroba na něm je možná pouze první 2 roky, poté už výrobní kapacita daného stroje nestačí na objem výroby. Výrobní časy vln jsou dostačující pro všech 5 let. Proces na vlně 2 je však nestabilní a docházelo k chybnému zapájení některých komponent. Z hlediska technologických a kvalitativních aspektů se nejvhodněji jeví vlna 3 (i přesto, že navzlínání v některých otvorech nebylo 100 %, bylo dostatečné podle požadavků normy IPC-A-610). Inertní atmosféra má pozitivní vliv jak na stabilitu procesu (není nutné příliš mnoho zásahů a častá údržba), tak na nižší tvorbu strusky, to znamená i úsporu v ohledu spotřeby pájecí slitiny. Naproti tomu je nutné uvažovat i cenu dusíku. Pro výrobu bude navíc potřeba vyrobit nové maskované pájecí rámy, aby bylo dosaženo požadovaných výrobních časů.

Součástka 3pin_maly působila potíže na všech výrobních zařízeních, vznikly proto tyto možnosti:

- Odstraňovat zkrat po strojové výrobě (cca 2 – 5 s na desku), zkrat se navíc nevyskytuje vždy
- Součástku zamaskovat a pájet ručně po strojové výrobě (5 - 10 s na desku), přičemž by bylo nutné dopájet všechny DPS, tím by výrazně vzrostl výrobní čas
- Najít vhodnou alternativu součástky pro technologii PinInPaste a zapájet ji v reflow peci (pokud by to bylo možné, jeví se tohle řešení jako nejlevnější a nejrychlejší)

Další možností by byl nákup nového, lepšího zařízení pro selektivní pájení, konkrétně zařízení VersaFlow345. V případě 2 pájecích hrnců v zařízení VersaFlow by čas pájení mohl být cca 55 s na jednu DPS. Zařízení je navíc uzpůsobené k montáži do výrobní linky, narozdíl od EBSO, které je konstruováno jako samostatné pracoviště. Cena stroje je však 200.000 Eur a to by se projevilo na celkových nákladech na výrobu produktu.

4. Závěr

V teoretické části diplomové práce byla řešena problematika selektivního pájení. Porozumění tomuto procesu a jeho možnostem je nutné pro to, abychom zvolili co nejvhodnější metodu pro konkrétní produkt. Dále byla zmíněna kontrola kvality, u které je důležité vědět, které chyby jsou kritické a poukazují na to, že daný výrobní proces nelze použít pro výrobu daného produktu.

V praktické části byla proměřena stabilita a reprodukovatelnost jednotlivých technologických možností selektivního pájení, které lze použít pro výrobu konkrétního produktu.

Při testování se ukázalo, že jedno zařízení nevyhovuje daným požadavkům a proto bylo vyřazeno z dalších produkčních testů a byla zjišťována stabilita samotného procesu. Při ověřování nanášení tavidla byl zjištěn vliv rychlosti posuvu tavidlové trysky a tlaku tavidlového systému na homogenitu nanesení tavidla. Rozdíly, které na první pohled nejsou úplně zřetelné, se však mohou projevit při výrobě desek plošných spojů. Dále bylo zjištěno, že množství sušiny téměř lineárně roste s množstvím aplikovaného tavidla na DPS v technologicky zajímavém rozsahu.

U měření přehřevů byl zjištěn pouze mírný vliv IR přehřevu na konečnou teplotu DPS před procesem pájení vlnou. Vliv se však může lišit, pokud použijeme jiné desky, jelikož souvisí i např. s barvou komponent umístěných na desce plošných spojů.

Při ověřování rovinnosti vlny byly zjištěny malé odchylky, které by se mohly minimalizovat nastavením dopravníku, trysky i levelingem pájecího stroje. Tyto odchylky souvisí i s fyzikální podstatou roztavené pájky a také s chybou měřicího přístroje.

U zbylých 3 zařízení byl dokončen produkční test a vyrobené testovací desky podrobněji zkoumány. Při rentgenové analýze byly odhaleny dutiny v pájeném spoji, nicméně většina pájených spojů je vyhovující. Při mikrovýbrusech bylo odhaleno nedostatečné propájení některých komponent na vlně 2, kde se výrobní proces ukázal jako nestabilní. Aby byl vhodný pro výrobu, musel by se pravděpodobně modifikovat, např. výměnou klasické čipové vlny za Wortmannovu trysku. U selektivního pájecího zařízení EBSO bylo pozorováno malé množství studených spojů a makrovoidů ve spoji, to by se dalo potlačit prodloužením kontaktní doby DPS a pájky.

Pro malosériovou výrobu v prvních letech lze použít selektivní zařízení EBSO, doporučuje se však prodloužení kontaktních dob při pájení. V dalších letech už však výroba z kapacitních důvodů možná nebude, proto se jeví vhodná vlna 3, jež měla uspokojivé výsledky ve všech ohledech a která stačí na požadované výrobní časy. U malého 3pinového konektoru by bylo vhodné posoudit, zda neexistuje vhodná alternativa pro reflow pájení a pokud ano, použít na jeho osazení do pájecí pasty technologii PinInPaste.

Před samotnou výrobou daného produktu se doporučuje produkční test ve větším rozsahu a rentgenová analýza, případně mikrovýbrus, pro získání většího množství dat pro statistické vyhodnocení.

Použitá literatura

- [1] STOKLÁSEK, L. *Porovnání tavidel pro strojní pájení vlnou*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií. Ústav elektrotechnologie, 2017. 47 s. Bakalářská práce. Vedoucí práce: Ing. Jiří Starý, Ph.D.
- [2] VALA, R. *Testování vlastností pájek v ochranné atmosféře*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, 2013. 77s. Vedoucí diplomové práce doc. Ing. Ivan Szendiuch, CSc.
- [3] AIM Metals & Alloys LP. AIM [online]. ©2013 [cit. 2018-11-30]. Dostupné na [www: https://www.aimsolder.com/](https://www.aimsolder.com/)
- [4] PROCHÁZKA, M. *Optimalizace procesu strojního pájení vlnou – bakalářská práce*. Brno 2009. 42 s. Vedoucí bakalářské práce Ing. Jiří Starý, Ph.D. FEKT VUT v Brně.
- [5] STARÝ, J., ZATLOUKAL, M. *Montážní a propojovací technologie*. Brno: 2015. s. 1-272.
- [6] IPC-A-610E CZ. *Kritéria přijatelnosti elektronických sestav*. Revize E-2010. PBT Rožnov p. R., s.r.o. Bannockburn, Illinois, USA: IPC, 2010
- [7] Reflow Soldering Process. *Surface Mount Process* [online]. [cit. 2019-05-18]. Dostupné z: <http://www.surfacemountprocess.com/reflow-soldering-process.html>
- [8] Pájení v parách. *SMT centrum* [online]. 26.6.2017 [cit. 2019-05-18]. Dostupné z: <http://www.smtcentrum.cz/pajeni-v-parach/pajeni-v-parach/>
- [9] Pin in paste. *Kurtz Ersa* [online]. [cit. 2019-05-18]. Dostupné z: <https://www.kurtzersa.com/electronics-production-equipment/solderlexicon/begriff/pin-in-paste-1.html>
- [10] VALÍČEK, Libor. Pájecí proces PIHR (Paste In Hole Reflow). *DPS Elektronika od A do Z* [online]. 2015, **2015**(2) [cit. 2019-05-18]. Dostupné z: <https://www.dps-az.cz/vyroba/id:23115/nove-v-e-archivu-pajeci-proces-pihr-paste-in-hole-reflow->
- [11] URBAN, Václav. *Laserové selektivní pájení v elektronice* [online]. [cit. 2019-05-18]. Dostupné z: <https://www.pbt.cz/cz/clanky/laserove-selektivni-pajeni-v-elektronice>
- [12] *Soldering flux datasheet* [online]. In: . s. 2 [cit. 2018-12-08]. Dostupné z: https://www.kester.com/DesktopModules/Bring2mind/DMX/Download.aspx?EntryId=4063&Command=Core_Download&language=en-US&PortalId=0&TabId=96
- [13] Ersa explains #7 – Soldering tips + applications. *Youtube* [online]. 18. 4. 2018 [cit. 2019-05-18]. Dostupné z: https://www.youtube.com/watch?time_continue=1&v=8tYguy5Zg6w
- [14] Pečujte o pájecí hroty!. *PBT Rožnov* [online]. [cit. 2019-05-18]. Dostupné z: <https://www.pbt.cz/cz/clanky/pajeci-hroty>

- [15] ŠEFARA, Petr *Výzkum spolehlivosti pájených spojů v dusíkové atmosféře*: diplomová práce. Místo: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, Ústav mikroelektroniky, 2015. 73 s. Vedoucí práce byl doc. Ing. Ivan Szendiuch, CSc.
- [16] CHVOJKA, Tomáš. Robotické stanice pro bodové pájení. *DPS Elektronika od A do Z* [online]. 2017, **2017**(5) [cit. 2019-05-18]. Dostupné z: <https://www.dps-az.cz/vyroba/id:53307/roboticke-stanice-pro-bodove-pajeni>
- [17] Selektivní pájení. *PBT Rožnov* [online]. [cit. 2019-05-18]. Dostupné z: <https://www.pbt.cz/cz/produkty/pajeni/selektivni-pajeni>
- [18] VONDRÁČEK, Jiří. Selektivní pájení a jeho metody. *DPS Elektronika od A do Z* [online]. 2010, **2010**(2) [cit. 2019-05-18]. Dostupné z: <https://www.dps-az.cz/vyroba/id:5951/selektivni-pajeni-a-jeho-metody>

Seznam obrázků

Obr. 1 Složky tavidla [1]	10
Obr. 2 Porovnání RTS (vlevo) a RSS (vpravo) teplotních profilů [5]	12
Obr. 3 Schematické naznačení pájecí pece [5]	13
Obr. 4 Použití pájkové preformy v technologii THR.....	14
Obr. 5 Příklady pájecích hrotů [13]	16
Obr. 6 Schematické naznačení pájecí vlny [1]	17
Obr. 7 Teplotní profil dvojité vlny [5]	19
Obr. 8 Pájecí maska užitá v praktické části (vlevo horní strana, vpravo spodní strana s DPS)	20
Obr. 9 Schéma s doporučenými mezioperačními kontrolami při výrobě DPS [5]	21
Obr. 10 Chybně zapájený vývod [6]	23
Obr. 11 Požadovaný stav zapájení [6]	23
Obr. 12 75 % úroveň zapájení vývodu [6]	23
Obr. 13 Meniskograf [1]	24
Obr. 14 Závislost smáčecí síly na čase [1]	25
Obr. 15 Testovaná deska – osazená vývodovými součástkami a zapájená	27
Obr. 16 Pájecí vlna Vitronics Soltec Delta 5	28
Obr. 17 Pájecí vlna Ersa Powerflow	29
Obr. 18 Pájecí vlna Ersa Powerflow e N2	30
Obr. 19 Selektivní pájecí zařízení EBSO a pájecí tryska použitá pro testování	31
Obr. 20 Deska vyrobená na vlně 1	32
Obr. 21 Měřicí zařízení WaveRider	33
Obr. 22 Schematické znázornění páj. programu (žlutá dráha nanášení tavidla, červená pájení)	35
Obr. 23 Profilační DPS	35
Obr. 24 Homogenita naneseného tavidla (zleva vlna 2, vlna 3, EBSO).....	36
Obr. 25 Zkratky mezi piny komponent	37
Obr. 26 Nedostatečné navzlínání u 3pinu a 6pinu	38
Obr. 27 Vyfouknutá bublina u vývodu konektoru	38
Obr. 28 Ostatní defekty po selektivním pájení	39
Obr. 29 Voidy na CT snímku konektoru	41
Obr. 30 Porovnání kvality zapájení 6pinového konektoru (shora vlna 2, vlna 3, EBSO)41	
Obr. 31 Porovnání kvality zapájení zeleného konektoru Con1 (Shora vlna 2, vlna 3, EBSO).....	42
Obr. 32 Mikrovýbrus černého konektoru (vlevo vlna 2, vpravo vlna 3, dole EBSO).....	43
Obr. 33 Mikrovýbrus 3pinového konektoru (vlevo vlna 2, vpravo vlna 3, dole EBSO)..	44
Obr. 34 Měřicí zařízení pro zjišťování kontaminace a nádoba použita pro výluh DPS .	45
Obr. 35 Tavidlové zbytky na DPS (Vlna 2 vlevo, zařízení EBSO vpravo).....	47
Obr. 36 Flux nanesený s různými nastaveními tlaku v tavidlovém systému	50
Obr. 37 Tavidlo nanesené s různou rychlostí fluxovací hlavy.....	51
Obr. 38 Obrazec při sníženém tlaku rozptylovacího vzduchu	51
Obr. 39 Pájecí rám s profilační deskou a měřicím zařízením	52
Obr. 40 Ukázka měření kontaktní délky pomocí skla (rychlost čerpadla 300 ot./min) ...	54

Seznam tabulek

Tabulka 1 Typy bezolovnatých pájecích slitin firmy AIM [3]	9
Tabulka 2 Rozdělení tavidel dle J-STD-004 [1]	11
Tabulka 3 Porovnání nejčastějších metod pájení přetavením [5]	13
Tabulka 4 Příklad kritérií přijatelnosti podle normy IPC-A-610E [6]	23
Tabulka 5 Popis vývodových součástek použitých pro testování	27
Tabulka 6 Finálně nastavené parametry pájecích vln	31
Tabulka 7 Kontaktní doby a kontaktní délky v čipové vlně	34
Tabulka 8 Kontaktní doby a kontaktní délky v laminární vlně	34
Tabulka 9 Četnost viditelných chyb u daných zařízení na finální nastavení pájecího programu.....	40
Tabulka 10 Procentuální chybovost jednotlivých procesů	40
Tabulka 11 Koncentrace nečistot po různých pájecích procesech	45
Tabulka 12 Koncentrace nečistot přepočtená na plochu s naneseným tavidlem	46
Tabulka 13 Tavidla využitá pro test smáčivosti vývodu.....	47
Tabulka 14 Vypočtené hodnoty sil a poměrů	48
Tabulka 15 Naměřené a vypočtené hodnoty měření solidů.....	49
Tabulka 16 Kontaktní doby, kontaktní délky a paralelnost vlny 1	54
Tabulka 17 Odečtené a vypočtené hodnoty ověřování pájecím sklem	55
Tabulka 18 Změřené a přepočtené časy výroby produktu.....	56
Tabulka 19 Maximální požadovaný čas výroby pro daná období.....	56

Seznam grafů

Graf 1 Naměřený teplotní profil vlny 2	33
Graf 2 Naměřený teplotní profil vlny 3	34
Graf 3 Teplotní profil selektivního zařízení EBSO	36
Graf 4 Porovnání kontaminace celé DPS a přepočtené koncentrace na plochu s naneseným tavidlem	46
Graf 5 Smáčivost vývodu v pájce SN100C pro různá tavidla	48
Graf 6 Závislost množství solidů na tlaku v tavidlovém systému	49
Graf 7 Průběh teplot s IR předehřevem na plný výkon	52
Graf 8 Průběh teplot s IR předehřevem na poloviční výkon	53
Graf 9 Průběh teplot s vypnutými IR předehřevy	53
Graf 10 Závislost kontaktních dob na otáčkách motoru čerpadla	55

Seznam použitých zkratek

BGA	Ball grid array
DPS	Deska plošných spojů
ESD	Electrostatic dissipative
HAL	Hot air leveling
IPA	Isopropylalkohol
IR	Infrared
PCB	Printed circuit board
PLCC	Plastic leaded chip carrier
QFN	Quad flat package
ROSE	Resistivity of solvent extract
RSS	Ramp-soak-spike
RTS	Ramp-to-spike
SEC	Solvent extract conductivity
SMD	Surface mounted device
SMT	Surface mount technology
TAL	Time above liquidus
THR	Through hole reflow
THT	Through hole technology
VOC	Volatile organic compound